

Joel Turunen

KAUKOLÄMPÖAKUN KÄYTÖN OPTI- MOINTI JA LYHYEN AIKAVÄLIN SUUN- NITTELU

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Maaliskuu 2019

TIIVISTELMÄ

JOEL TURUNEN: Kaukolämpöakun käytön optimointi ja lyhyen aikavälin suunnittelu

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 65 sivua

Maaliskuu 2019

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Systemien hallinta

Tarkastajat: professori Matti Vilkkonen, DI Yrjö Majanne

Avainsanat: Kaukolämpöakku, lämmön ja sähkön yhteistuotanto, optimointi, MILP, liukuvan aikaikkunan menetelmä

Uusiutuvien energianlähteiden kasvava käyttö energiamarkkinoilla on johtanut tarpeeseen parantaa sähkön ja lämmön yhteistuotannon (CHP) kannattavuutta sen kilpailukyvyn ylläpitämiseksi. Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden siirtyminen tuntikohtaiseen kysynnän ja tarjonnan määrittämään sähkönhintaan korosti lämpökuorman seuraamisen ongelmia CHP-tuotannossa. Samaan aikaan säätilasta riippuvat sähköntuotantotavat ovat voimistaneet vuorokauden sisäisiä sähkönhintavaihteluja entisestään.

Tässä työssä CHP-tuotannon kannattavuutta yritetään parantaa kaukolämpöakun (KL-akku) käyttöä suunnittelevalla optimointimallilla. Optimointimallin tavoitefunktiolla pyritään minimoimaan kaukolämmöntuotantoon vaadittavat tuotantokustannukset ja maksimoimaan sähköntuotannon kannattavuutta. Jotta tehtävällä optimointimallilla voidaan ohjata KL-akkua automaattisesti kaikissa CHP-tuotannon normaaleissa tuotantotilanteissa, CHP-tuotanto prosessirajoitteineen mallinnetaan mahdollisimman tarkasti. Tämän vuoksi optimointimallista tehdään MILP-malli (eng. Mixed Integer Linear Programming), jolla tarkasteltavaa epälineaarista ja aikajatkuvaa systeemiä mallinnetaan osittaislinearisoinnin ja aikadiskretisoinnin avulla pitäen optimointiongelma samalla lineaarisena. Jotta optimointimallia voidaan käyttää ohjaamaan KL-akkua jatkuvaluonteisessa CHP-tuotannossa, optimointimalliin sovelletaan liukuvan aikaikkunan menetelmää. Optimointimallin tulos on seuraavan vuorokauden KL-akun käyttösuunnitelma, jolla CHP-tuotannon käyttökustannus saadaan mahdollisimman pieneksi. Optimointimallia voidaan käyttää sekä automaattiseen KL-akun ohjaukseen että tuottamaan tietoa KL-akun investointipäätöksiin.

Optimointimallin soveltuvuutta tutkimusongelmaan tutkittiin vertailemalla sen suunnittelemaa KL-akun käyttöä Vapo Oy:n Forssan voimalaitoksen toteutuneeseen KL-akun käyttöön vuoden ajalta. Optimointimallin vakioparametrit asetettiin kuvaamaan Forssan CHP-tuotantoa ja sisään syötettävänä parametreina käytettiin oikeassa tuotannosuunnittelussa käytettyjä tietoja. Optimointimallin todettiin soveltuvan KL-akun käytön lyhyen aikavälin suunnitteluun ja parantavan CHP-tuotannon kannattavuutta 2.3 % KL-akun ympärivuotisella aktiivisella käytöllä. Lisäksi systeemin tarkemman mallinnuksen avulla pystyttiin arvioimaan käytännön prosessirajoitteiden vaikutuksia optimoinnilla saavutettaviin tuloksiin käyttökustannuksien pienentämisessä.

ABSTRACT

JOEL TURUNEN: Optimization and short-term scheduling of heat storage operation

Tampere University

Master of Science Thesis, 65 pages

March 2019

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: System operation

Examiners: Professor Matti Vilkkö, M.Sc. Yrjö Majanne

Keywords: Heat storage, combined heat and power, optimization, MILP, sliding time window method

Increasing usage of renewable energy sources has led to a need to improve the competitiveness of existing combined heat and power (CHP) production. Moving to liberalized electricity markets in Nordic countries has highlighted the problem of heat demand based electricity production in CHP plants. Increasing volume of solar and wind power has increased the daily variation in hourly electricity prices.

In this work, the operating cost of CHP production is being reduced by creating optimization model to schedule the operation of heat storage. The objective function of the model targets to minimize heat production costs and maximize profits of electricity production. To implement the optimization model in practice and automate the heat storage operation in every normal production situation the CHP production with its real-life process constraints are modelled. To model the time-variant and non-linear system closely enough MILP (Mixed Integer Linear Programming) model was selected and used to create part linear model of the system. Sliding time window method was also used in optimization to enable most optimal heat storage operation in practice. The output of the optimization model is operation plan of heat storage for next day which provides the smallest operating cost for CHP production. The model can be also applied for heat storage investment planning.

To validate the model, the scheduled operation is compared to actual operation of heat storage of Vapo's CHP plant in Forssa. Model is calibrated into Forssa's CHP production and input parameters were the same that has been used in actual production planning. The optimization model worked without issues and decreased the CHP production's operating costs 2.3 % in one-year period. Also, the effects of real-life process constraints to the achievable optimization results could be evaluated by the more closely modelling of the system.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Vapo Oy:tä mielenkiintoisesta ja käytännöllisestä diplomityöaiheesta. Suuret kiitokset kaikille työkavereilleni, jotka ovat minua auttaneet työn toteuttamisessa. Erityisesti tahdon kiittää Jari Kymäläistä asiantuntevasta työnohjauksesta ja jatkuvasta sparrauksesta työn edetessä. Valtavat kiitokset myös TTY:n puolelta Matti Vilkolle ja Yrjö Majanteelle työni ohjaamisesta ja erinomaisista kommentteista.

Haluan muistaa lämpimällä kiitoksella perhettäni. Ilman teidän kannustustanne opiskeluun ja asioiden oppimiseen ei yliopistomatvani olisi koskaan tapahtunut. Lopuksi tärkein kiitos Ellulle, jonka tuki ja motivointi oli välttämätön palanen opiskelujeni ja tämän työn onnistumisessa.

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 1.1 | Työn tavoite..... | 2 |
| 1.2 | Aiheen aikaisempi tutkimus | 3 |
| 1.3 | Tutkimusmenetelmät..... | 5 |
| 1.4 | Rakenne..... | 6 |
| 2. | KAUKOLÄMPÖAKKU | 7 |
| 2.1 | Kaukolämpöakun toimintaperiaate | 7 |
| 2.2 | Kaukolämpöakun hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa..... | 11 |
| 2.3 | CHP-tuotannon mallintaminen KL-akun optimointimallissa | 17 |
| 2.4 | Kaukolämpöakun käyttöä rajoittavat tekijät | 18 |
| 3. | TUTKIMUSMENETELMÄT | 21 |
| 3.1 | Optimointimallin muodostaminen..... | 21 |
| 3.2 | Liukuvan aikaikkunan menetelmä | 30 |
| 3.3 | Optimointiongelman ratkaiseminen | 32 |
| 4. | CASE FORSSA | 33 |
| 4.1 | Forssan kaukolämpötuotanto..... | 33 |
| 4.2 | Data-analyysi..... | 36 |
| 5. | TULOKSET | 43 |
| 5.1 | Optimointimallin vertaaminen nykykäytäntöön..... | 43 |
| 5.2 | Käytännön rajoitteiden vaikutus KL-akun käytössä | 57 |
| 6. | POHDINTA | 62 |
| 7. | YHTEENVETO | 64 |
| | LÄHTEET..... | 66 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|---------|--|
| CHP | Lämmön ja sähkön yhteistuotanto |
| KL-akku | Kaukolämpöakku |
| LP | Lineaarinen optimointi (eng. Linear Programming) |
| MILP | Lineaarinen sekalukuoimointi (eng. Mixed Integer Linear Programming) |

| | |
|-------------|--|
| ΔT | Lämpötilaero |
| Δt | Käyttöaika |
| η | Hyötysuhde |
| Φ | Lämpöteho |
| Φ_{pa} | Polttoainetehtä |
| α | Rakennusaste |
| ρ | Tiheys |
| a | Binäärimuuttuja |
| c | Ominaislämpö lämpötilan ja paineen funktiona |
| C | Kustannus |
| d | Halkaisija |
| h | Entalpia |
| l | Korkeus |
| P | Sähkötehtä |
| q | Tehtä |
| Q_a | Akkumuloitu energia |
| T | Aikaikkunan pituus |
| T | Lämpötila |
| T_{rs} | Kaukolämpöverkon paluuvesi laitokselle |
| T_{ss} | Kaukolämpöverkon menovesi laitokselta |
| x | Konveksikombinaatioiden määritysmuuttuja |
| y | Binäärimuuttuja |
| yd | Käytön aloituksen binäärimuuttuja |
| yu | Käytön lopetuksen binäärimuuttuja |

Alaindeksit

| | |
|-------|-----------------|
| aux | Apujäähdytys |
| av | Keskiarvo |
| dh | Kaukolämpö |
| fgs | Savukaasupesuri |
| g | Generaattori |
| h | Lämpöhäviö |
| HOB | Lämpölaitos |
| hot | Lämminalue |
| k | Kattila |
| max | Maksimi |
| min | Minimi |

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| <i>net</i> | Netto |
| <i>oil</i> | Öljy |
| <i>omak</i> | Omakäyttö |
| <i>r</i> | Rakennusaste |
| <i>s-</i> | KL-akun purkaminen |
| <i>s+</i> | KL-akun lataaminen |
| <i>start/stop</i> | KL-akun käytön aloitus- tai lopetus |
| <i>t</i> | Turbiini |
| <i>tot</i> | Kokonais |
| <i>w</i> | Vesi |

1. JOHDANTO

Fossiilisten energiavarojen väheneminen on kiihdyttänyt uusiutuvien energianlähteiden käyttöä sekä ohjannut nostamaan jo olemassa olevien tuotantolaitosten energiatehokkuutta. Kilpailevien tuotantotapojen, kuten lämpöpumppujen ja aurinkoenergian, kehitys painostavat parantamaan tuotantolaitosten toimintaa kilpailukyvyyn ylläpitämiseksi. Myös lämmön ja sähkön yhteistuotannon (CHP) parempi hyötysuhde verrattuna erillistuotantoon [1] on johtanut Euroopan Unionin vaatimaan CHP-tuotannon tehokkaampaa hyödyntämistä kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi [2]. CHP-tuotannon pienemmän polttoainekulutuksen tuoman hyödyn kääntöpuolena on huonompi joustavuus, koska sähköntuotanto on sidottu tiukasti lämmönkuorman suuruuteen [3].

Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden siirtyminen tuntikohtaiseen kysynnän ja tarjonnan määrittämään sähkönhintaan korosti lämpökuorman seuraamisen ongelmia sähköntuotannossa. Toisistaan poikkeavat kaukolämmön- ja sähkönkulutuksen vuorokausirytmit ovat johtaneet epäedulliseen sähköntuotannon ajoitukseen CHP-laitoksissa. Säätilasta riippuvan tuuli- ja aurinkosähköntuotannon lisääntyminen on voimistanut vuorokauden sisäistä sähkönhintavaihtelua entisestään.

Vuonna 2017 Suomessa 62 % CHP-tuotannosta syntyneestä lämmöstä käytettiin kaukolämpöverkossa [2], jolloin lämpö hyödynnetään kiinteistöjen ja niiden käyttöveden lämmityksessä. Ulkolämpötilasta ja vuorokaudenajasta riippuvan kaukolämpökuorman seuraaminen muuttaa CHP-prosessin toimintapistettä jatkuvasti vaikuttaen usein negatiivisesti kokonaishyötysuhteeseen ja prosessin käyttöikäen [4]. Tästä huolimatta lämmöntuotannon ja kaukolämpöverkon kulutuksen tulee pysyä tasapainossa suurten lämpöhäviöiden estämiseksi ja lämmönriittävyyden takaamiseksi asiakkaille.

Tuotettavan lämpökuorman suuruuteen pystytään vaikuttamaan CHP-laitoksen ja kaukolämpöverkon väliin asennettavalla kaukolämpöakulla (KL-akku). Kaukolämpövedellä täytettävä KL-akku toimii lämminvesivaraajana, jota voidaan ladata lämpökuorman ollessa matala ja purkaa lämmönkysynnän ollessa suurta. Täten sähköntuotannon riippuvuutta kaukolämmönkysynnästä voidaan vähentää ja CHP-prosessin joustavuus paranee. KL-akun tuomalla joustavuudella kaukolämmöntuotannon kannattavuutta voidaan parantaa siirtämällä sähköntuotantoa korkean sähkönhinnan tunneille, vähentämällä vara- ja huippulaitosten käyttöä, lisäämällä CHP-tuotantoa ja pitämällä CHP-prosessia hyötysuhteeltaan hyvällä toiminta-alueella.

Kiristyvät päästörajoitukset ja energiatehokkuuden vaatimukset sekä kasvavat tuotantokustannukset korostavat CHP-tuotannon optimoinnin tärkeyttä. Samalla kaiken tehoisten

CHP-laitoksien etäoperoimisen salliminen vuoden 2017 alusta [5] lisää operaattoreiden työmäärää heidän operoidessaan useita laitoksia yhtäaikaaisesti. Operaattoreilla on yhä vähemmän aikaa käytettäväksi yksittäisen CHP-tuotannon optimointiin tai KL-akun käytön lyhytaikaiseen suunnitteluun. Tämä johtaa energiatehokkuus- ja tuotantotavoitteissa pysymisessä ongelmiin, jotka voitaisiin ainakin osittain ratkaista, jos KL-akun käyttö olisi automaattista vuoden ympäri.

1.1 Työn tavoite

Tässä työssä tutkitaan KL-akun käytön optimointia ja lyhyen aikavälin suunnittelua CHP-tuotannon tehostamiseksi sekä KL-akun operoinnin automatisoimiseksi. KL-akun operoinnissa keskitytään käytön ajoittamiseen, eli milloin KL-akua tulisi ladata ja purkaa CHP-tuotannon taloudellisen tehostamisen näkökulmasta.

Tutkimuksen tavoitteena on tuoda taloudellisia ja käytännöllisiä hyötyjä kaukolämpöakulla varustettuun CHP-laitokseen. Taloudelliset hyödyt perustuvat polttoainekustannuksien vähenemiseen, CHP-tuotannon lisäämiseen ja sähköntuotannon siirtämiseen korkean sähkönhinnan tunneille. Käytännölliset hyödyt tarkoittavat akun ohjauksen onnistumista jatkossa ilman voimalaitosoperaattorin manuaalista työtä, jolloin operaattorille jää enemmän aikaa muihin tehtäviin. Lisäksi tavoitteena on saada tuotettua entistä tarkempaa tietoa KL-akkuun liittyvien investointipäätösten tueksi.

Työn tavoitteet voidaan tiivistää seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Kuinka paljon nykykäytäntöä voidaan parantaa käyttämällä matemaattista optimointia CHP-tuotannossa olevan KL-akun lyhyen aikavälin käytön suunnittelussa?
2. Mikä on lämmöntuotannon ennustevirheiden ja käytännön prosessirajoitteiden vaikutus KL-akun käytön suunnittelussa?

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen näkökulmana on KL-akun operoinnin kehittäminen vaihtamalla käyttöä suunnitteleva menetelmä. Toisessa tutkimuskysymyksessä vastauksen tarkoituksena on tuoda uutta tietoa käytännön rajoitteiden vaikutuksista prosessin kehittämiseksi ja uusien KL-akkuinvestointien tueksi.

Työssä keskitytään tutkimaan paineistamatonta lämpöakua, johon varastoidaan lämpöä veden avulla. Työssä tehtävä suunnittelumalli on tarkoitus ottaa käyttöön kaukolämpöakulla varustetussa CHP-laitoksessa. Tämän vuoksi mallin tulee huomioida CHP-laitoksen, kaukolämpöakun ja -verkon rajoitteet kaikissa ajotilanteissa. Rajoitteiden vaikutuksia KL-akun operoimiseen ja tuotannon käyttökustannuksiin tutkitaan prosessin kehittämiseksi. Saatuja tuloksia käytännön rajoitteiden vaikutuksista käyttökustannuksiin voidaan hyödyntää myös uuden KL-akun suunnitteluvaiheessa. Työssä ei tarkastella KL-akun käyttöä sähköntuotannon tasevirheiden korjaamiseksi.

1.2 Aiheen aikaisempi tutkimus

Kysyntään ja tarjontaan pohjautuvien sähkömarkkinoiden myötä CHP-tuotannon optimointia KL-akun operoinnin avulla on tutkittu paljon. Suurin osa tutkimuksista käsittelee KL-akun lisäämisen ja mitoituksen vaikutuksia toiminnassa olevan CHP-systeemin käyttökustannuksiin. Optimointiongelman ratkaisemiseksi on esitelty useita eri optimointitekniikoita ja -algoritmeja, mutta hallitsevina menetelminä ovat olleet lineaarinen mallinnus ja sen alaluokat.

Fragaki ym. (2008) tutkivat kaasumoottoreilla ja KL-akulla varustetun CHP-systeemin taloudellisia vaikutuksia ja optimaalista kokoa. Tutkimuksessa määritettiin taloudellisin sähköteho kaasumoottorille ja sopivin lämpöakun kapasiteetti Britannian energiamarkkinoilla. Optimointiongelma ratkaistiin energyPRO-ohjelmiston ja Microsoft Excel'in avulla. Fragaki ym. tulosten perusteella laitosinvestoinnin takaisinmaksuaika on yli puolet lyhyempi lämpöakun kanssa kuin ilman lämpöakkua. [6]

Streckiene ym. (2009) analysoivat KL-akulla varustetun CHP-laitoksen soveltuvuutta Saksan sähkön spot-markkinoille. Tutkimuksessa tarkasteltiin KL-akun vaikutusta CHP-tuotannon kannattavuuteen sekä KL-akun kapasiteetin vaikutusta sähkön spot-markkinoilla toimivan tuotantolaitoksen mitoitukseen. CHP-laitoksen taloudellisesti optimaalinen investointi KL-akun kanssa ratkaistiin energyPRO -ohjelmistolla. Menetelmä todettiin toimivaksi tavaksi suunnitella spot-markkinoilla toimivia lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia. Myös KL-akun tuoman joustavuuden todettiin kasvattavan CHP-tuotannon kannattavuutta. [7]

Christidis ym. (2012) tutkivat työssään suuren kaukolämpöverkon yhteydessä toimivan CHP-tuotannon kannattavuuden parantamista KL-akun avulla. Tutkimuksessa vertailtiin kannattavinta kokoa KL-akulle eri käyttökustannus skenaarioilla sekä tutkittiin CHP-laitoksien operointia KL-akun lisäämisen jälkeen. Optimointi suoritettiin muodostamalla voimalaitoksen kaukolämmöntuotannosta MILP-ongelma (eng. Mixed-Integer Linear Programming) GAMS-ohjelmistossa [8], ja ratkaisemalla muodostettu ongelma CPLEX-ratkaisimen [9] avulla. KL-akkuinvestoinneille laskettiin parhaan ja huonoimman skenaarion takaisinmaksuajat. Numeeristen tulosten perusteella KL-akkuinvestoinnin todettiin olevan tuottoisa investointi tarkasteltavassa systeemissä. [10]

Giuntoli ja Poli (2013) muodostivat MILP-ongelman ratkaistakseen useita pieniä tuottajia ja energiavarastoja sisältävän virtuaalivoimalaitoksen seuraavan vuorokauden optimaalisen lämmön- ja sähköntuotannon ajoituksen. Tutkimuksen MILP-malli ratkaistiin branch and cut -algoritmin avulla, joka todettiin riittävän tehokkaaksi ongelman ratkaisemiseksi. Työssä tehdystä tapaustutkimuksesta saatiin hyviä tuloksia ja muodostetun mallin todettiin kykenevän ennakoimaan tuotannon operoinnin korjaamista toimituspäivän arvaamattomissa tilanteissa. [11]

Nuytten ym. (2013) kehittivät geneerisen mallin lämmönvarastoinnin sisältävästä CHP-systeemistä tarkastellakseen joustavuuden lisäämistä tuotantoprosessissa. Tutkimuksessaan Nuytten ym. määrittivät mallin avulla teoreettisen joustavuuden, joka voitaisiin saavuttaa joko keskitetyllä tai hajautetulla lämmön lyhytaikaisella varastoinnilla. Tutkimuksen mukaan keskitetty lämmönvarastointi on CHP-systeemin joustavuuden lisäämisen kannalta hajautettua varastointia parempi ratkaisu. Maksimaalinen lisäjoustavuus todettiin saavutettavan tehokkaalla suureen keskitettyyn lämpövaraston kytketyllä CHP-tuotannolla. [12]

Noussan ym. (2014) mitoittivat tutkimuksessaan optimaalista kaukolämpöakun sisältävää CHP-systeemiä sekä talous- että energiasäästön näkökulmasta. Tutkimuksessa arvioitiin kaukolämpöakkuinvestoinnin takaisinmaksuaikaa sekä sen tuomia energiasäästöjä simuloimalla KL-akun sisältävää CHP-laitosta oikean kaukolämpöverkon datalla. KL-akun optimaalisen tilavuuden huomattiin eroavan selvästi talous- ja energianäkökulmien välillä. [13]

Fang ym. (2015) kehittivät optimointimallin käyttökustannuksien minimoimiseksi CHP-tuotannon sisältävässä kaukolämpösystemissä. Tutkimuksessa CHP-tuotannosta muodostettiin monijaksoinen lineaarinen optimointiongelmaksi, johon sisällytettiin kaukolämpöakun rajoitteita sekä päätösmuuttuja erillisen lämpölaitoksen käytöstä lämmön tuottamiseksi. Tutkimuksessa esitettiin liukuvan aikaikkunan menetelmä, ja sitä sovellettiin ratkaistaessa optimointiongelmasta CHP-tuotannon operointia. Optimointimallissa oletettiin, että CHP-tuotanto, KL-akun varaus ja KL-akun käyttöteho voivat vaihdella nollan ja vakiomaksimiarvon välillä, lisäksi CHP-laitoksen oletettiin toimivan vakio rakennusasteella. Mallia testattiin historiadatalla, johon oli lisätty häiriötä mallintamaan sähkön hinta- ja ilmanlämpötilaennusteiden epätäydellisyyttä. Parhaaksi optimointihorisontiksi määritettiin 5 päivää historiadatalla saadun käyttökustannuksen sekä käytännössä saatavilla olevien ennusteiden perusteella. Fang ym. vertasivat saamiaan tuloksiaan CHP-tuotantoon ilman KL-akkua ja KL-akun käytön optimointiin ilman ennustevirheitä. Liukuvan aikaikkunan menetelmän todettiin hyödyttävän sekä uuden KL-akun mitoituksessa että CHP-tuotannon operoinnissa. [14]

Zheng ym. (2018) käyttivät lineaarista optimointia yhdistettynä liukuvan aikaikkunan menetelmään arvioidessaan biomassaa polttoaineena käyttävän CHP-systeemin sopivaa mitoitus- ja käytön ajoitusta. Tutkimuksen kohteena oleva CHP-systeemi sisälsi CHP-laitoksen, lämpökattilan, kaasuttimen, kaasuvälikon ja lämpöakun. Mallin avulla määritettiin tuotannon mitoitus ja operointi. Saatuja tuloksia tarkasteltiin tekemällä herkkyyssanalyysia vaihtelevilla käyttökustannuksilla ja tuotantomäärillä. Energiavälikon todettiin laskevan huomattavasti kustannuksia, mutta systeemin ja energiavälikon lyhyen aikavälin operoinnin suorituskykyä vaihtelevissa tehotarpeissa ei tarkasteltu. [15]

Novak ym. (2018) tekivät mallin KL-akun sisältävästä CHP-laitoksesta ja tutkivat mallin avulla KL-akun potentiaalia yhteistuotannossa. Mallin tavoitteena oli maksimoida tuotetusta sähköstä saatava hinta. Malli perustui lineaariseen optimointiin ja liukuvaan optimointihorisonttiin. Optimointihorisonttina Novak ym. käyttivät 7 vuorokautta. Optimointimallia käytettiin arvioimaan eri kokoisten KL-akkujen hyötyjä CHP-laitoksessa vuoden ajalta kerättyjen kaukolämmönkulutus- ja sähkönhintadatojen avulla. Tutkimuksen mukaan sähköntuotannosta saatavia tuloja pystytään kasvattamaan huomattavasti siirtämällä sähköntuotantoa kaupallisesti kannattaville tunneille KL-akun käytön ajoituksen avulla. [16]

Aikaisemmin tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet lineaarisen optimoinnin tehokkaaksi tavaksi suunnitella KL-akun mitoitus ja operointia CHP-tuotannon optimoimiseksi. Toisin kuin aiemmissa tutkimuksissa, tässä tutkimuksessa muodostetaan malli jo käytössä olevan KL-akun ja CHP-tuotannon optimoimiseksi, jolloin KL-akun kapasiteettiin ei voida vaikuttaa. Lisäksi optimointimallissa CHP-tuotannon epälineaarisuuksia kuvataan osittaislinearisoinnilla, ja optimointimalliin sisällytetään tuotannossa huomattut KL-akun operointiin vaikuttavat prosessirajoitteet. Tämän myötä ratkaistava optimointiongelma laajenee ja sen tulokset kuvaavat paremmin käytännössä saavutettavissa olevia tuloksia. Näin ollen myös optimointimallin määrittämiä asetusarvoja voidaan käyttää luotettavasti KL-akun automaattisessa ohjauksessa.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltavasta systeemistä muodostetaan optimointimalli. Optimointimalli muodostetaan kuvaamalla KL-akun sisältävän CHP-tuotannon käyttökustannusta tavoitefunktioilla. Tarkasteltavan systeemin ominaisuuksia kuvataan mallissa rajoitusyhtälöiden avulla. Rajoitusyhtälöt rajaavat systeemin muuttujille ratkaisujoukon, jonka sisältä optimointimalli etsii muuttujille tavoitefunktion kannalta parhaat mahdolliset arvot. Näin pystytään matemaattisesti kuvaamaan tutkittava systeemi.

CHP-tuotannon ja kaukolämpöakun lyhytaikainen tuotannonsuunnittelu on monijaksoinen epäkonveksi optimointiongelma. Mallinnustekniikaksi valittiin MILP, koska MILP-malleissa pystytään kuvaamaan ongelman epälineaarisuutta lineaarisilla osajoukoilla lineaarista (LP) mallia tarkemmin. Samalla malli säilyy lineaarisena, jolloin ratkaiseminen on helpompaa vastaavaan epälineaarisen mallin verrattuna. MILP-malli muodostetaan R-ohjelmointikielellä, koska sen ominaisuudet ja matemaattiset kirjastot sopivat hyvin sekä mallin muodostamiseen että eri ratkaisualgoritmien käyttämiseen.

Toisessa vaiheessa tehtyyn optimointimalliin sovelletaan liukuvan aikaikkunan menetelmää, koska aikaisemmat tutkimukset ovat todenneet sen parantavan lyhyen aikavälin suunnittelun toimintaa käytännössä. Menetelmää ovat onnistuneesti soveltaneet CHP-tuotannon ja KL-akun lineaariseen malliin Fang ym. (2015) ja Novak ym. (2018). Menetelmässä määritetään optimointimallille sopiva aikajakso, eli optimointihorisontti, jolle

optimointimalli laskee parhaat käyttöarvot kustannusfunktion minimoiseksi tai maksimoimiseksi. Liian lyhyt optimointihorisontti johtaa tuotannon operoimiseen lähitulevaisuuden kustannuksella, jolloin KL-akku voi olla tyhjä, kun sitä eniten tarvittaisiin. Liian pitkä optimointihorisontti ei taas ole käytännössä luotettava ennusteiden epätarkkuuden lisääntyessä.

Lopuksi muodostettua MILP-mallia ja CPLEX-ratkaisinta [9] R-ympäristössä käytetään määrittämään kaukolämpöakun optimaalinen käyttö. CPLEX-ratkaisinta päätettiin käyttää, koska se on yleisesti tunnettu hyvänä laajojen lineaaristen optimointiongelmien ratkaisimena, ja sitä on käytetty onnistuneesti aihepiirin vastaavien optimointiongelmien ratkaisemisessa [10, 17].

Rakennettavan optimointimallin rajoitteineen on oltava ratkaistavissa kaikissa olosuhteissa, jotta ympärivuotinen automaattinen käyttö saavutetaan. Ratkaistavuus varmistetaan soveltamalla luvussa 2 esiteltävää teoriaa sekä lisäämällä malliin mahdollisuus käyttää apukattiloita tai -jäähdytystä. Optimointialgoritmin laskentatehokkuuden arvioiminen ei ole tässä tutkimuksessa oleellista, koska laskenta suoritetaan vain kerran vuorokaudessa, eikä laskenta-ajalle ole siten tiukkoja rajoitteita.

1.4 Rakenne

Työn rakenne muodostuu tarkasteltavan prosessin teoriasta, tutkimuksissa käytettävistä menetelmistä ja huomioitavista käytännön rajoitteista sekä saatujen tuloksien esittelystä. Teoriaosassa esitellään KL-akun toimintaperiaatteet ja käyttäminen CHP-tuotannossa. Seuraavaksi tutkimuksessa käytettävät menetelmät esitellään, ja niitä sovelletaan tarkasteltavan optimointiongelman mallintamisessa. Tämän jälkeen optimointimallia simuloidaan oikealla tuotannon historiadatalla ja saatuja tuloksia vertaillaan nykykäytäntöön. Seuraavaksi tärkeimmät tulokset tiivistetään, ja niiden merkitystä pohditaan. Työ päättyy yhteenvetoon, jossa tiivistetään työn tärkeimmät huomiot.

2. KAUKOLÄMPÖAKKU

Tässä kappaleessa esitellään KL-akun teoriaa ja käyttöä CHP-tuotannossa. Luvussa keskitytään ainoastaan tutkimuskysymyksien kannalta oleelliseen lämmön lyhytaikaiseen varastointiin KL-akussa, ja sen vaikutuksiin kaukolämmöntuotantoon.

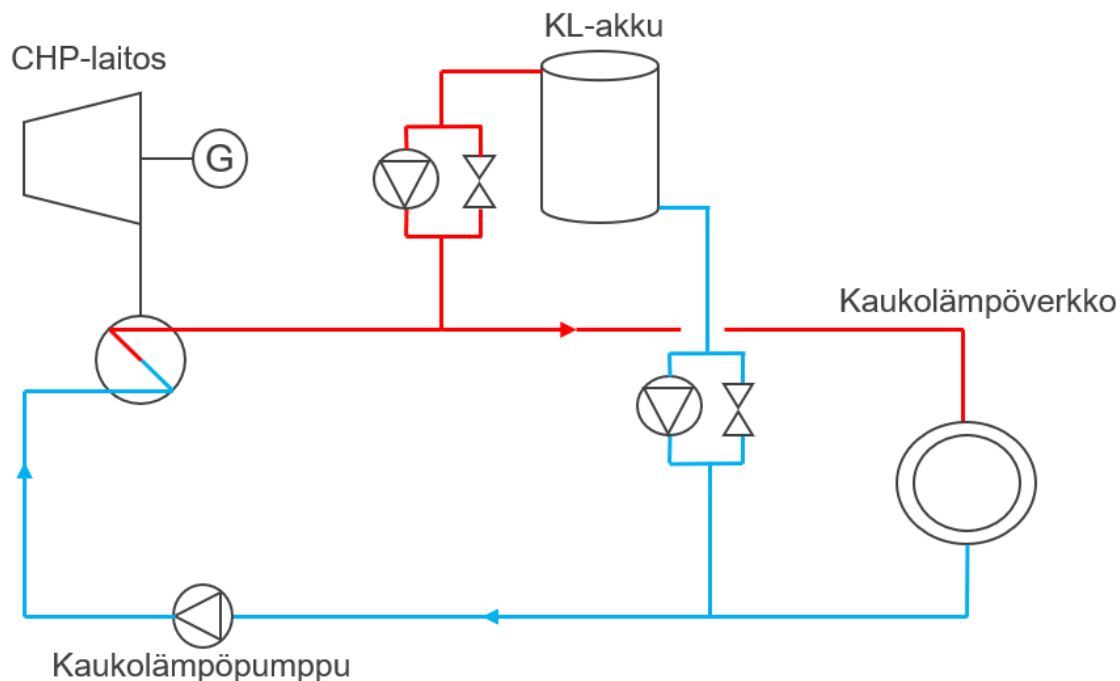
Ensin luvussa esitellään KL-akun toimintaperiaate lämmön varastoinnissa sekä tärkeimmät teoreettiset kaavat. Seuraavaksi käsitellään KL-akun käyttöä ja hyödyntämistä osana CHP-laitoksella toteutettavaa kaukolämmön- ja sähköntuotantoa. Tämän jälkeen esitetään periaatteet CHP-tuotannon mallintamisesta KL-akun käytön optimoinnin mahdollistamiseksi. Viimeiseksi luvussa kuvataan tutkimuksessa huomioitavat käytännön rajoitteet KL-akun käytössä.

2.1 Kaukolämpöakun toimintaperiaate

Yleensä lyhytaikaiseen lämmön varastointiin käytettävä KL-akku on vedellä täytettävä säiliö. [18] Vesi toimii energiaa varastoivana massana sekä väliaineena energian siirrossa. Tätä tekniikkaa kutsutaan tuntuvan lämmön varastoksi, jossa energian varastointi perustuu veden lämpötilaeroihin.

KL-akku voidaan kytkeä kaukolämpöjärjestelmään joko suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Suorassa kytkennässä KL-akussa kiertää sama vesi kuin kaukolämpöjärjestelmässä. KL-akku kytketään sekä kaukolämpöverkon meno- että paluupuoleen siten, että lämmin menopuoli kytketään KL-akun yläosaan ja kylmempi paluupuoli alaosaan. Epäsuorassa kytkennässä KL-akku liitetään kaukolämpöjärjestelmään lämmönsiirtimellä, jolloin KL-akulla on oma erillinen vesikierto. [19] Tässä työssä tarkastellaan vesikierrotetaan suoraan kaukolämpöjärjestelmään liitettyä KL-akkua.

Veden virtaaminen sisään ja ulos voidaan toteuttaa suoralla kytkennällä liitettyyntä KL-akkuun kahdella tavalla. KL-akku voi olla yhdistetty kaukolämpöverkon paineeseen tai olla paineeltaan eristetty [18]. Paineeltaan eristetyllä KL-akulla on omat lataus- ja purkupumppunsa, jotka mahdollistavat kaukolämpöverkon tilasta riippumattoman KL-akun käytön [20 s.155]. Tässä työssä tarkastellaan paineeltaan eristettyä KL-akkua. Paineeltaan eristetyn KL-akun kytkentäkuva CHP-laitokseen kaukolämmöntuotannossa on esitetty kuvassa 1.

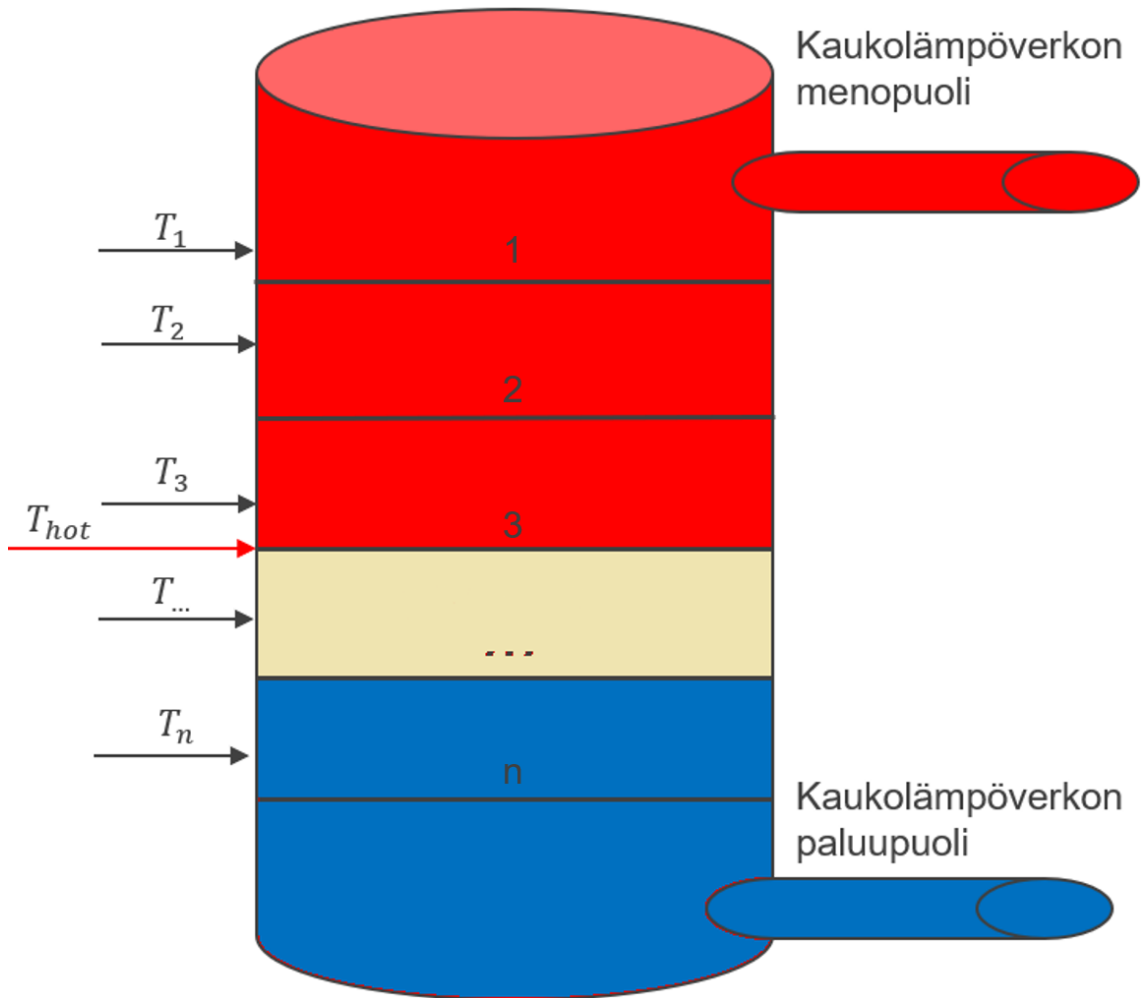


Kuva 1. KL-akun paine-eristetty kytkentä CHP-laitokseen kaukolämmöntuotannossa.

KL-akku voi olla paineistettu tai paineistamaton. Paineistetuissa KL-akuissa on mahdollista varastoida vettä, jonka kiehumispiste on yli 100 °C. Käytännössä paineistamattomat akut ovat myös hieman paineistettuja, joten niiden suurin sallittu käyttöveden lämpötila on yli 100 °C. Kaukolämpöverkoissa käytetään usein paineistamattomia akkuja, koska kaukolämpöverkon menoveden lämpötila on vain harvoin selvästi yli 100 °C. [19, 20]

KL-akun peruseriaate on, että vettä voidaan varastoida samaan tilaan eri lämpötiloissa ilman, että vesi sekoittuu. Sekoittumattomuus johtuu veden kerrostumisesta KL-akun säiliössä niin, että pienemmän tiheyden omaava kuuma vesi nousee säiliön yläosaan ja kylmä vesi laskee pohjaan. Kylmän ja kuumen veden välissä on alue, jossa lämpötilagradientti on suuri. Tämä alue erottaa kylmän ja kuumen veden toisistaan ja on korkeudeltaan n. 1 metrin. [18]

Lämpöä varastoidessa, eli KL-akkua ladatessa, menopuolen kaukolämpövettä pumpataan akun yläosaan. Samaan aikaan KL-akun alaosasta pumpataan samansuuruinen vesimäärä kylmempää vettä kaukolämpöverkon paluupuoleen. Ladattaessa KL-akku toimii kaukolämmön kulutuskohteen tavoin. Latauksen aikana kylmän ja kuumen veden toisistaan erottava alue laskee alemmas. KL-akkua purkaessa vettä pumpataan akun yläosasta kaukolämpöverkkoon ja kaukolämmön paluuvettä johdetaan KL-akun alaosaan. Purettaessa KL-akku toimii kaukolämmön tuottajana, ja kylmän veden raja nousee säiliössä ylemmäs. Veden kerrostuminen ja KL-akun suora vesikiertokytkentä kaukolämpöverkkoon esitetään kuvassa 2. [18]



Kuva 2. Lämmön kerrostuminen KL-akussa ja KL-akun suora vesikiertokytkentä.

Kuvassa 2 KL-akku on mallinnettu useista lämpötila-alueista $1-n$, joihin vesi on kerrostunut lämpötilan mukaan. Kuvassa muuttuja T_{hot} on KL-akun niin kutsutun lämpimän alueen viimeinen lämpötila-alue, jonka alapuolella on kuumen ja kylmän veden erottava alue. KL-akkuun varastoitu kokonaisenergia Q_a voidaan laskea kerroksittain kaavalla (2-1)

$$Q_a^t = \sum_n \frac{\pi d^2}{4} l_n p_w c_w (T_n^t - T_{rs}^t), \quad (2-1)$$

jossa d on KL-akun vesitilan halkaisija, l_n on n :nnen alueen korkeus, p_w on veden tiheys 970 kg/m^3 , c_w on veden ominaislämpö lämpötilan ja paineen funktiona, T_n on veden lämpötila alueella n ajanhetkellä t ja T_{rs} on kaukolämpöverkon paluulämpötila kapasiteetin laskentahetkellä. [21]

KL-akkuun varastoidun lämpimän kaukolämpöveden käyttö on kannattavaa, kun sen lämpötila on $30 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ kaukolämpöverkon paluuvien lämpötilaa korkeampi [18]. Tällöin KL-akusta saadaan purettua tehoa kaukolämpöverkkoon ilman liian suurta massavirtaa. Tästä johtuen KL-akusta kaukolämpöverkkoon lämmitykseen käytettävissä oleva

lämpöenergia vaihtelee kaukolämmön paluuveden sekä menoveden lämpötilan mukaan. Siksi KL-akusta tulee määrittää lämmin alue, jossa kaukolämmön paluuveden ja KL-akkuun varastoidun veden lämpötilaero on riittävä. Lämmin alue voidaan määrittää laske-
malla viimeinen mittauspiste T_n , joka toteuttaa kaavan (2-2) ehdon.

$$T_n \geq T_{rs} + \Delta T_{hot}, \quad (2-2)$$

jossa T_n on tarkasteltavan lämpötila-alueen veden lämpötila, T_{rs} on kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila ja ΔT_{hot} on edellä mainittujen lämpötilojen vaadittu vähimmäisero. Nyt määritettyä lämpimän alueen viimeistä aluetta n voidaan käyttää kaavassa (2-1) KL-akkuun varastoidun lämpöenergian Q_a laskemisessa.

Edellä esitetyt laskentatavat eivät tuota täysin eksaktia tietoa KL-akun lämpötilaprofiilista. Varastoidun energian määrittämisessä oletetaan, että veden lämpötila on jokaisella mittausalueella n vakio ja lämpötilajakauma alueen n sisällä on laskennan kannalta merkityksetön. Nämä oletukset tehdään mm. siksi, että alueen sisäistä lämpötilajakaumaa ei tiedetä.

KL-akun lyhyen aikavälin käyttöä suunniteltaessa aloitushetken varastoituna oleva lämpöenergia Q_a^0 voidaan määrittää kaavasta (2-1). Tulevaisuuden hetkiin kaavaa ei kuitenkaan voida soveltaa, koska lämpötilojen ja -jakaumien muutosta lataus- tai purkutehojen mukaan ei tiedetä. Myöhempien ajanhetkien suunnittelussa akkumuloituna oleva lämpöenergia voidaan määrittää yksinkertaisemmalla kaavalla

$$Q_a^t = Q_a^{t-1} + q_{s+}^{t-1} - q_{s-}^{t-1} - q_h^{t-1}, \quad (2-3)$$

jossa t kuvaa alkavaa ajanhetkeä, q_{s+}^{t-1} on edellisen ajanhetken latausteho, q_{s-}^{t-1} on edellisen ajanhetken purkuteho ja q_h^{t-1} on edelliselle ajanhetkellä tapahtunut lämpöhäviö. On huomioitava, että kaava (2-3) ei huomioi kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilavaihteluiden vaikutusta varastoituun energiamäärään. Tässä työssä käsiteltävä lämmön lyhyt-aikainen varastointi oletetaan häviöttömäksi, joten lämmön varastoinnissa tai siirtymisessä tapahtuviin lämpöhäviöihin ei oteta kantaa.

Kaavassa (2-3) käytettyjen lataustehon q_{s+} ja purkutehon q_{s-} suuruus voidaan laskea kaavalla

$$q_s = \dot{m}(h_{av}^{hot} - h_{rs}), \quad (2-4)$$

jossa \dot{m} on lataus- tai purkuputken veden massavirta, h_{av}^{hot} on lämpimän alueen keskimääräinen entalpia ja h_{rs} kaukolämpöverkon paluuveden entalpia [21]. Samalla kaavalla voidaan määrittää KL-akun maksimikäyttöteho korvaamalla massavirta \dot{m} KL-akun pumpun maksimimassavirralla \dot{m}_{max} .

2.2 Kaukolämpöakun hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa

KL-akkua voidaan hyödyntää kaukolämmöntuotannossa sekä CHP-laitoksen energiatehokkuuden ja käytön kannattavuuden parantamisessa että kaukolämpöverkon toimintavarmuutta nostavana komponenttina. CHP-tuotannon näkökulmasta KL-akulla voidaan vaikuttaa CHP-laitoksen toimintapisteeseen, vähentää huippulaitoksien ja apujäähdityksen tarvetta sekä siirtää sähköntuotantoa optimaalisiin ajankohtiin. Tässä työssä keskitytään ainoastaan KL-akun käytön suunnittelulla saavutettavaan hyötyihin CHP-laitoksella tuotettavassa kaukolämmöntuotannossa. Näiden hyötyjen lisäksi kaukolämpöverkon kannalta KL-akkua voidaan käyttää normaalitilanteessa paisuntasäiliönä ja kaukolämpövuodoissa isona lisävesisäiliönä.

2.2.1 Kaukolämpöakun vaikutus lämmöntuotantoon

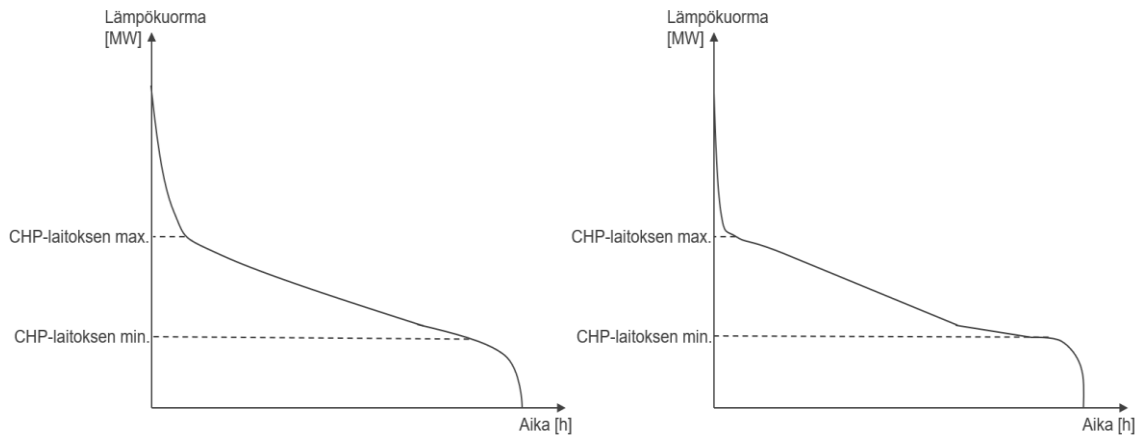
KL-akun avulla lämmöntuotannon suuruutta voidaan tasata, jolloin tuotannon energiatehokkuutta saadaan nostettua sekä vähennettyä fossiilisten polttoaineiden osuutta tuotannossa. Kun CHP-tuotantoa käytetään kaukolämmöntuotannossa, CHP-voimalaitoksen toimintapistettä ohjaa kaukolämpöverkon lämmöntarve, joka määrittää CHP-laitoksen lämmöntuotantotehon kaavan (2-5) mukaisesti.

$$\Phi_{dh} = \Phi_t + \Phi_h, \quad (2-5)$$

jossa Φ_{dh} on tuotettu kaukolämpöteho, Φ_t on kaukolämpöverkon tehotarve ja Φ_h on kaukolämpöverkossa tapahtuva lämpöhäviö [22 s.107].

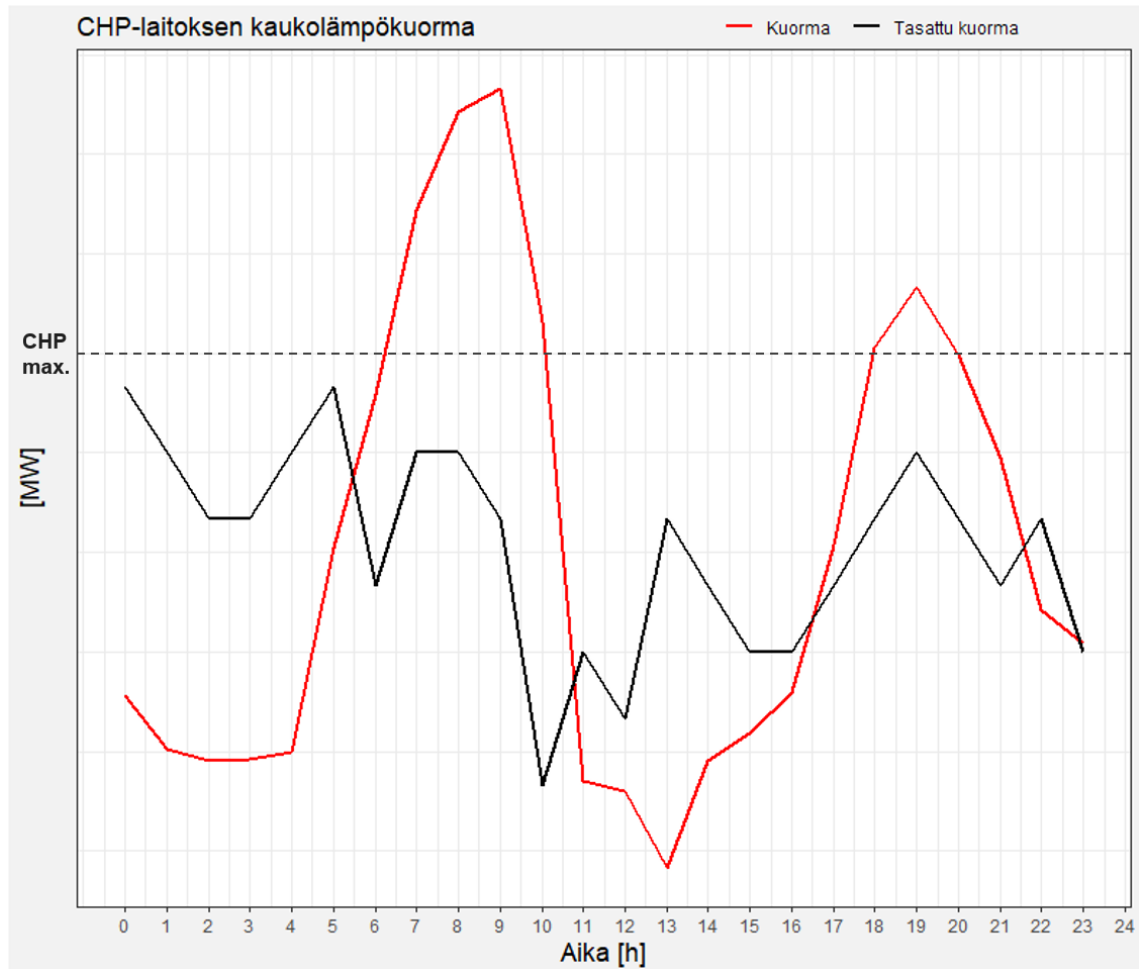
Suurimman osan vuodesta kaukolämpöverkon lämpöteho on CHP-laitoksen toiminta-alueella, eli tuotettavissa CHP-laitoksella. Tämän suurusluokan lämpötehoa kutsutaan peruskuormaksi. Sen sijaan hetkiä, jolloin tarvittava lämpöteho on yli CHP-laitoksen lämmöntuotantokapasiteetin, kutsutaan huippukuormiksi. Huippukuormien aikaan lämmöntuotannossa on käytettävä apukattiloita lämpökuorman tuottamiseksi. Apukattilat ovat yleensä teholtaan CHP-laitosta pienempiä kaasui- tai öljykattiloita, jotka on tarkoitettu vain väliaikaiseen käyttöön. Tämän vuoksi niiden käyttökustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin CHP-laitoksen käyttökustannukset. [20]

Kun lämpökuorma on liian matala tuotettavaksi CHP-laitoksella, täytyy lämpökuormaa kasvattaa apujäähdityksellä, jolloin tuotetusta lämmöstä ei saada korvausta. Toinen vaihtoehto on tuottaa lämpö matalien kuormien aikana apukattiloilla, jolloin käyttökustannukset ovat korkeammat. Kuvassa 3 on havainnollistettu eri kuormatasojen tyypilliset kestoajat kaukolämpöverkossa sekä ilman KL-akun vaikutusta että sen kanssa yhden vuoden aikana.



Kuva 3. Oikealla lämpökuorman pysyvyyskäyrä ilman KL-akkua ja vasemmalla KL-akulla tasattuna yhden vuoden aikana.

CHP-laitoksen energiatehokkuutta ja -käytettävyyttä saadaan nostettua korvaamalla apujäähdityksen ja -kattiloiden käyttöä KL-akulla. Tarpeen vähentäminen tapahtuu kaukolämpökuormien vuorokausirytmien tasaamisella. [23] Tällöin KL-akkua ladataan kuormien ollessa pieniä, jolloin KL-akku toimii apujäähdityksen tavoin, mutta tuotettu lämpö voidaan käyttää myöhemmin, kun kuorma on jälleen kasvanut. Huippukuormien aikana KL-akusta syötetään siihen aiemmin varastoitua lämpöä kaukolämpöverkkoon, jolloin vältetään CHP-laitoksen tehovajeen täyttäminen huippulaitoksilla. Kuvassa 4 on havainnollistettu tasaamattoman ja tasatun kaukolämpökuorman ero vuorokauden ajalta.



Kuva 4. Kaukolämpökuorman käyttäytyminen sekä ilman tasaamista että KL-akulla tasattuna suuren kaukolämpökuorman omaavan vuorokauden aikana.

Kuvassa 4 esitetyn kaukolämpökuorman tasaamisen avulla tarvittava kaukolämpöteho saadaan pidettyä CHP-laitoksen toiminta-alueella. Täten apukattilan käytön vähentämisellä saadaan suuria säästöjä CHP-tuotannon käyttökustannuksiin. Säästöt perustuvat apukattiloiden kalliimpien polttoaineiden tuotannon korvaamiseen CHP-laitoksen polttoainekustannuksilla sekä sähköntuotantomäärän kasvuun CHP-tuotanto-osuuden noustessa. Vastaavasti matalilla kuormilla tasaamisella saadaan käyttökustannusta pienennettyä, mutta tällöin säästöt perustuvat apujäähdytyksen vähentämiseen.

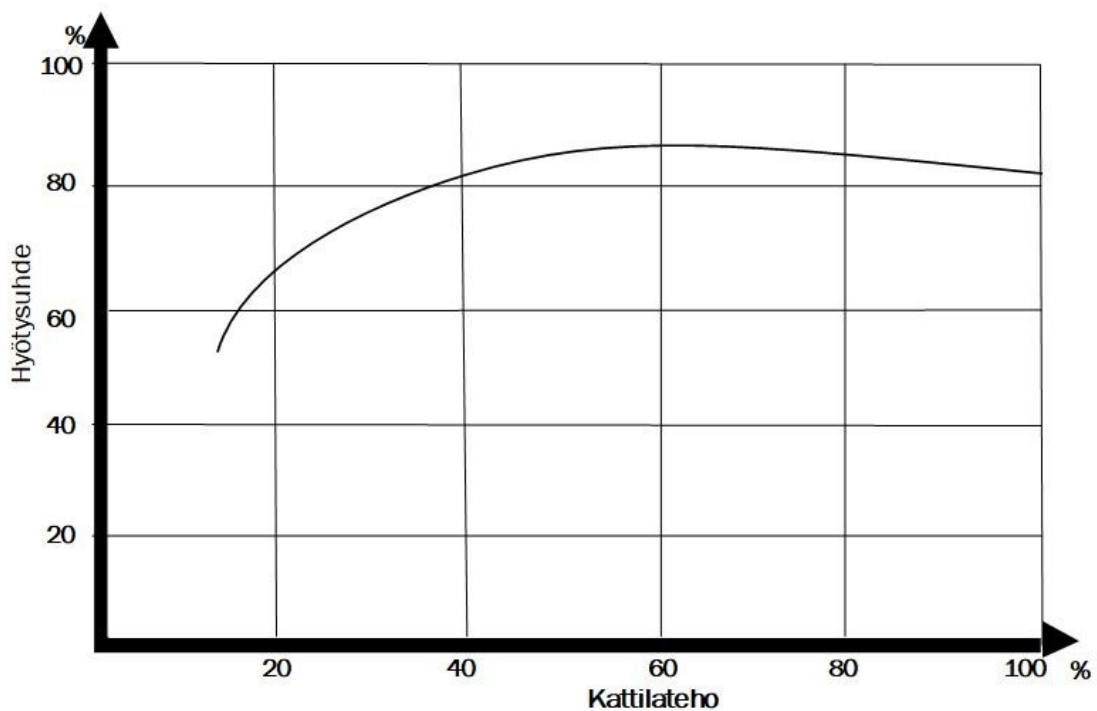
Myös peruskuormien aikana KL-akun käytöllä voidaan nostaa CHP-tuotannon energiatehokkuutta. Silloin CHP-laitoksen kaukolämpökuormaa nostetaan tai lasketaan KL-akun avulla niin, että CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on mahdollisimman hyvä. Jotta KL-akkua voidaan käyttää tuotannon kokonaishyötysuhteen nostamisessa, on CHP-laitoksen hyötysuhteen käyttäytyminen kaukolämpötehon suhteen tunnettava.

CHP-laitoksen kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavat laitoksen kattilahiötysuhde, turbiinin hyötysuhde ja laitoksen omakäyttöhyötysuhde [22 s. 74]. CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde η_{tot} voidaan laskea kaavalla

$$\eta_{tot} = \eta_k \eta_t \eta_g \eta_{omak}, \quad (2-6)$$

jossa η_k on kattilahiötysuhde, η_t turbiinin hiötysuhde, η_g generaattorin hiötysuhde ja η_{omak} omakäytön hiötysuhde [22 s. 74]. Sähköntuotannon hiötysuhteen tavoin kattilahiötysuhde ja omakäytön hiötysuhde vaihtelevat laitoksen toimintapisteen mukaan.

Kaukolämmöntuotannossa toimivan vastapainevoimalaitoksen kattilahiötysuhde on noin 90 %. Suurin osa häviöistä syntyy kattilan savukaasuhäviöistä [24 s.11]. Savukaasuhäviöiden lisäksi hiötysuhdetta laskevat palamishäviöt ja säteilyhäviöt ympäristöön. Voimalaitoksen kattilahiötysuhteen käyttäytyminen tehon suhteen on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kattilahiötysuhteen käyttäytyminen tehon funktiona.

Kuvasta 5 nähdään, että kattilan hiötysuhde on huonoin pienillä osakuormilla. Osakuormien huono hiötysuhde selittyy esimerkiksi tehosta riippumattomista lämpöhäviöistä. Suurinta mahdollista kuormatasoa lähestyttäessä hiötysuhde heikkenee hieman, koska lämmönsiirtimien lämpötilaerojen kasvaessa savukaasujen jäähtyvyys huononee. [24 s. 110]

Omakäyttösähkö huomioi hiötysuhdelaskennassa energiantuotannon vaatiman sähkönkulutuksen. Omakäyttösähköä kuluu esimerkiksi puhaltimien ja pumppujen käyttöön. Tuotetusta sähkötehon ja omakäyttösähkötehon erotuksena saadaan laitoksen nettosähköteho P_{net} . [22]

Voimalaitoksen tuotannon kokonaishyötysuhde η_{tot} voidaan laskea myös nettosähkötehon P_{net} , kaukolämpötehon Φ_{kl} ja prosessiin tuodun polttoainetehon Φ_{pa} avulla kaavan (2-7) mukaisesti.

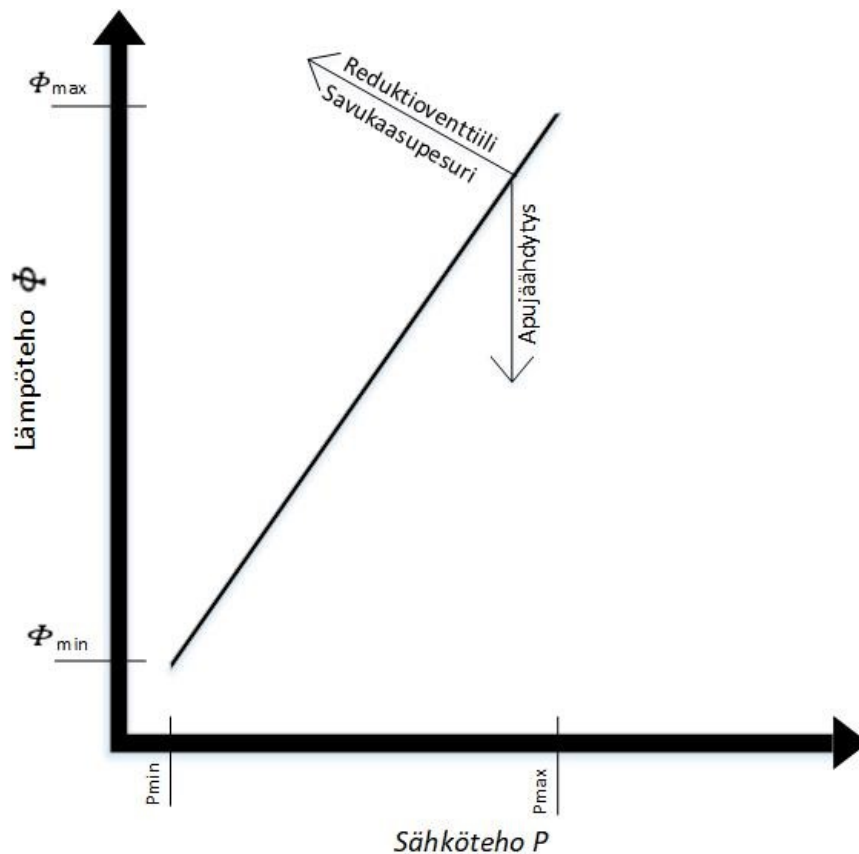
$$\eta_{tot} = \frac{P_{net} + \Phi_{kl}}{\Phi_{pa}} \quad (2-7)$$

Kaavan (2-7) osoittaja on myös CHP-laitoksen nettokokonaisteho.

2.2.2 Kaukolämpöakun vaikutus sähköntuotantoon

Luvussa 2.2.1 esiteltiin KL-akun käyttöä CHP-tuotannon hyötysuhteen ja energiatehokkuuden parantamisessa sekä käyttökustannuksien pienentämisessä kaukolämpökuormaa tasaamalla. Suurimman osan vuodesta kaukolämpökuorma on kuitenkin CHP-laitoksen toiminta-alueella, jolloin kaukolämpökuorman tasaamisen hyödyt ovat pieniä. Tällöin KL-akkua voidaan hyödyntää sähköntuotannossa.

CHP-laitoksen lämmön- ja sähköntuotanto ovat sidottu tiukasti toisiinsa, jolloin lämmön- ja sähköntuotanto seuraavat yhteistä karakteristikkaa. Kuvassa 6 on esimerkki tyypillisestä CHP-laitoksen lämpötehon Φ ja sähkötehon P välisestä karakteristikasta.



Kuva 6. CHP-laitoksen lämpö- ja sähkötehon välinen karakteristika.

Kuvan 6 karakteristikassa on havainnollistettu CHP-laitoksen toiminta-alueen rajaavat lämmön- ja sähköntuotannon minimi- ja maksimitehot. Nämä tehot määrittävät laitokohtaisesti, ja riippuvat laitoksen teknisistä ominaisuuksista. Lisäksi kuvassa 6 on havainnollistettu reductioventtiilin, savukaasupesurin ja apujäähdytyksen käytön vaikutukset karakteristikaan.

Kuvassa 6 esitettyä lämpö- ja sähkötehon suhdetta kutsutaan CHP-laitoksen rakennusasteeksi. Rakennusaste α voidaan laskea kaavan (2-8) mukaisesti [4].

$$\alpha = \frac{\Phi_{kl}}{P_{net}} \quad (2-8)$$

Rakennusaste käsitetään usein matemaattisessa mallinnuksessa vakiona tehon suhteen, mutta sen suuruuteen voivat vaikuttaa kaukolämpötuotannossa kaukolämpöverkon meno- ja paluulämpötilat [19 s. 493]. Lisäksi rakennusasteen suuruus vaihtelee tehoalueittain. CHP-laitoksen rakennusaste vaihtelee CHP-laitoksen tekniikasta ja toimintapisteestä riippuen 0.1 ja 0.5 välillä [25].

CHP-laitoksen sähköntuotannon kannattavuutta parannettaessa KL-akun avulla, CHP-laitoksen kaukolämpötehoa säädetään lisäämällä tai vähentämällä kaukolämpöverkon kulutuksesta KL-akun käyttöteho. Tällöin CHP-laitosta voidaan ajaa kaukolämpökuorma suuremmalla teholla sähkönhinnan ollessa korkealla ja vastaavasti pienemmällä teholla hinnan ollessa matala. CHP-laitoksen kaukolämpötehon ja kaukolämpöverkon tehon erotus on kaukolämpöakun käyttöteho kyseisessä tilanteessa. [20]

Kaukolämpökuorman ollessa CHP-laitoksen toiminta-alueella, KL-akun käytön avulla ei saada tuotettua yhtään enempää sähköä kuin ilman KL-akkua. Sähköntuotannon kannattavuuden parantaminen perustuu ainoastaan CHP-laitoksen tehon säätelyyn sähkönhintannusteen mukaan, jolloin tuotetusta sähköstä saadaan vuorokausi- tai viikkotasolla korkeampi keskihinta [14].

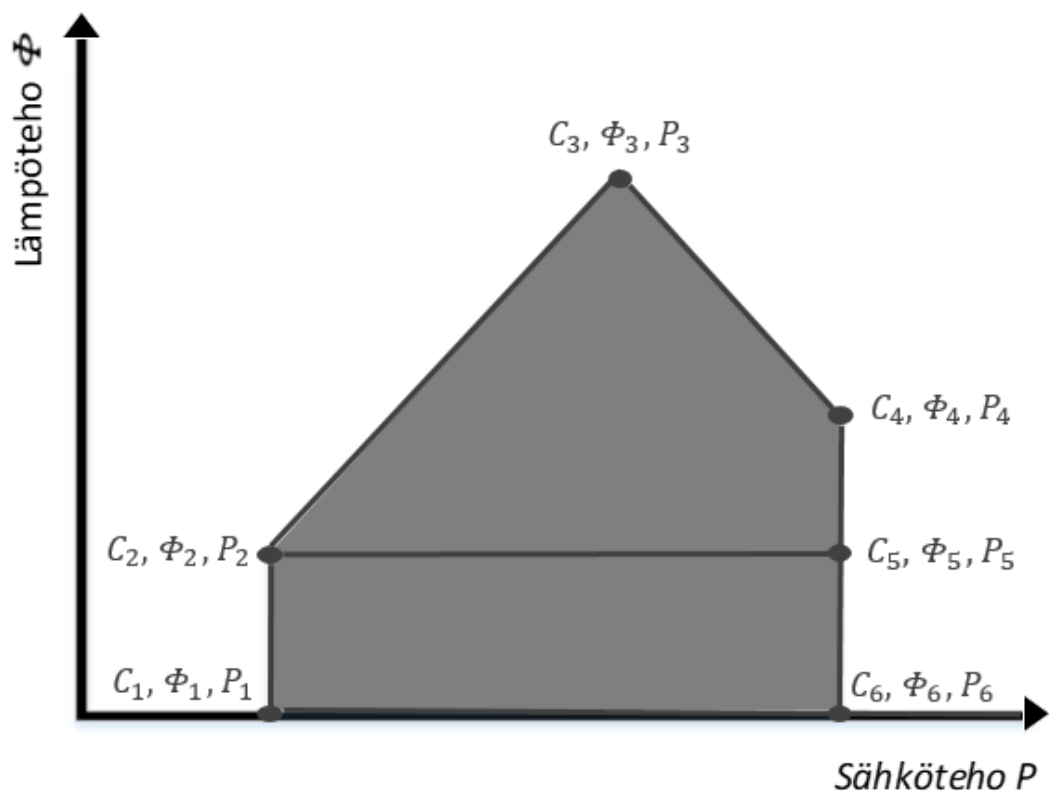
Tuotantotehoa säädettäessä KL-akun avulla CHP-laitoksen ja kaukolämpöverkon lämpötehojen erotus voi olla maksimissaan yhtä suuri kuin KL-akun suurin sallittu käyttöteho. Mitä suuremmalla teholla KL-akkua voidaan ladata ja purkaa, sitä suurempi hyöty KL-akusta saadaan sähköntuotannon ajoittamisessa kannattaville tunneille. Lataus- ja purkutehojen kasvattamista rajoittavat kuitenkin useat kaukolämpöjärjestelmän käytännön rajoitteet, jotka käsitellään luvussa 2.4.

Sähköntuotantoa pystytään erottamaan kaukolämpöverkon tehotarpeesta myös käyttämällä apujäähdytintä. Toisin kuin KL-akun käytöllä, apujäähdytyksen avulla pystytään sähköä tuottamaan enemmän kuin ilman apujäähdytystä. Ongelmana on, ettei tuotetusta lämmöstä saada korvausta. KL-akulla säädetyssä lämpötehossa lisäkäyttökustannukset

sen sijaan muodostuvat vain KL-akun lämpöhäviöistä ja pumppauskustannuksista. Tämän takia apujäähdyttimen käyttö sähköntuotannon lisäämiseksi on harvoin kannattavaa. [22 s. 104]

2.3 CHP-tuotannon mallintaminen KL-akun optimointimallissa

Jotta CHP-tuotannon kustannustehokkuutta voidaan parantaa säätämällä kaukolämpökuorman suuruutta KL-akun avulla, tulee CHP-tuotannon ja tuotantokustannuksien yhteys mallintaa matemaattisesti. Yhteyden mallintamiseksi tuotannon toimintapisteen ja tuotantokustannusten yhteys voidaan esittää CHP-laitoksen toiminta-alueena. Esimerkki CHP-laitoksen toiminta-alueesta esitetään kuvassa 7.

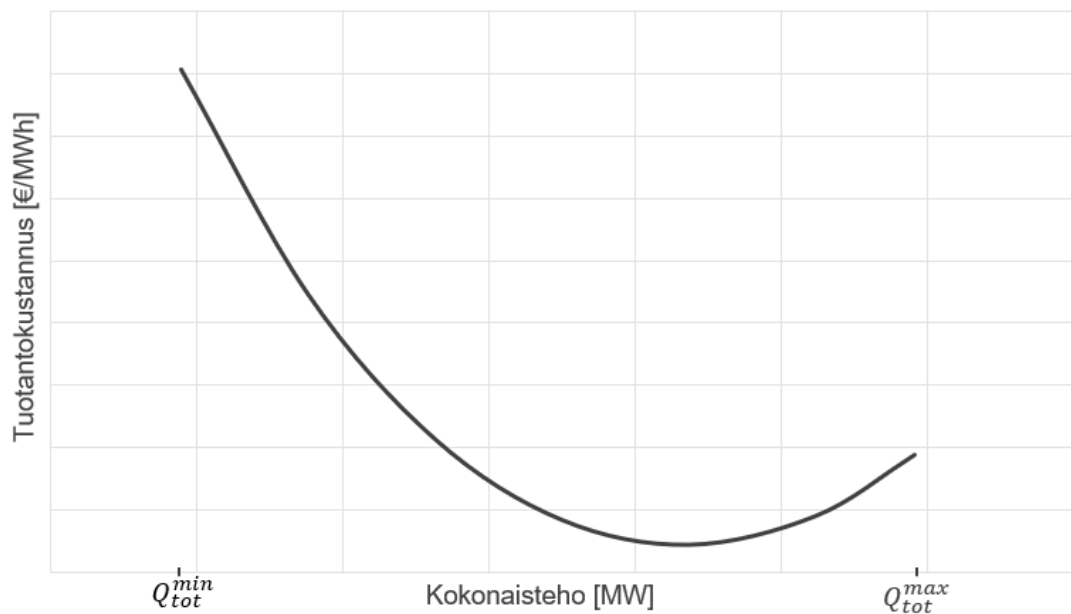


Kuva 7. CHP-laitoksen toiminta-alue ja alueen ääripisteet ΦP -tasossa.

Kuvassa 7 toiminta-alue kuvataan ΦP -tasossa konveksina pintana, jossa jokaisella pinnan pisteellä on oma tuotantokustannus C_i , kaukolämpöteho Φ_i ja nettosähköteho P_i . Toiminta-alueen oletetaan olevan konveksitaso, jossa myös kustannus on lämpö- ja sähkötehosta riippuvainen konveksifunktio. Konveksilla toiminta-alueella tarkoitetaan, että CHP-laitos voi toimia useassa eri pisteessä, mutta myös jokaisessa pisteessä ääripisteiden välisellä alueella. Tämän oletuksen avulla kustannus, lämpö- ja sähköteho voidaan esittää konveksikombinaatioina pisteiden C_i , Φ_i ja P_i avulla. [26] Todellisuudessa kaukolämpöntuotannossa toimivan CHP-laitoksen toiminta-alue ei ole näin yksinkertainen, vaan

tuotannon suunnittelussa on otettava huomioon epälineaarisen kokonaishyötysuhteen vaikutus, laitoksen minimiteho, kaukolämpöverkon tehontarve sekä toiminta-aluetta monimutkaistavat komponentit, kuten esim. apujäädytin ja savukaasupesuri. [27]

Tässä työssä on tarkoitus tutkia kaukolämpöakun lyhyen aikavälin suunnittelun vaikutuksia kaukolämmöntuotantoon, joten höyryturbiinin ohituksella tehtävän lisälämmöntuotannon vaikutuksia CHP-laitoksen toiminta-alueeseen ei huomioida. Täten CHP-laitoksen tarkasteltava toiminta-alue käsitetään tässä tutkimuksessa kuvan 8 mukaisena tuotantokustannuskäyränä kokonaistehon funktiona.



Kuva 8. Tuotantokustannus CHP-laitoksen kokonaistehon funktiona.

Kuvassa 8 x-akselin CHP-laitoksen kokonaisteho Q_{tot} jakautuu nettosähkö- ja netto-kaukolämpötehon kesken kuvan 6 ΦP -karakteristikan mukaisesti ja tuotantokustannus on yksikössä €/MWh. Esitetyllä tavalla kuvataan CHP-laitoksen tuotantokustannus optimointimallin kustannusfunktiossa. Optimointimallin pitämiseksi lineaarisena kuva 8 linearisoidaan. Sekä kustannusfunktio että kuvalle 8 tehtävä linearisointi esitetään myöhemmin luvussa 3.

2.4 Kaukolämpöakun käyttöä rajoittavat tekijät

Energiantuotannossa esiintyvät rajoitteet täytyy huomioida KL-akun operoinnissa. Huomioitavat rajoitteet ovat KL-akun omat prosessirajoitteet ja kaukolämmöntuotannon rajoitteet. Tässä luvussa esiteltävät fyysiset rajoitteet aiheuttavat eroa teoriassa mahdollisen ja käytännössä toteutettavissa olevan KL-akun käytön välille. Ensimmäiseksi esitellään KL-akun prosessirajoitteet, jonka jälkeen käydään läpi KL-akun käyttöä rajoittavat kaukolämmöntuotannon prosessirajoitteet.

2.4.1 Kaukolämpöakun käytännön rajoitteet

Etsittäessä optimaalista suunnitelmaa CHP-tuotannon käyttökustannuksien pienentämiseksi KL-akun käytöllä, oletetaan usein, että KL-akun lataus- ja purkutehot voivat vaihdella nolla- ja maksimitehon välillä vapaasti. Käytännössä lataus- ja purkupumppuilla on minimivirtaus, joka rajoittaa minimitehoa. Minimivirtauksen määrittää pumpun imupuolelle tarvittava minimipaine, jolla imupuolella oleva neste ei ala kiehua eli höyrystyä. Lataus- ja purkutehon minimi voisi olla hyvin lähellä nollaa, jos lataus- ja purkupumppuja olisi kytketty rinnan useita eri kokoisia. Käytännössä KL-akuissa on kuitenkin vain yksi lataus- ja yksi purkupumppu, joten optimointimallissa tulisi käyttää lataamisen ja purkamisen minimitehon rajoitteena KL-akun pumppujen minimivirtaamista laskettuja tehoja.

KL-akun käyttötehoalueen ylärajan määrittää KL-akun maksimikäyttöteho. KL-akun lataus- ja purkupumppuilla on maksimipumppauskapasiteettinsa, josta muodostuu suurin mahdollinen käyttöteho KL-akun näkökulmasta. Maksimikäyttöteho ei ole vakio, vaan riippuu pumppauskapasiteetin lisäksi myös varastoidun veden ja paluuveden entalpiaerosta kaavan (2-4) mukaisesti. Lisäksi luvussa 2.3.2 esiteltävät kaukolämpötuotannon rajoitteet voivat asettaa maksimikäyttöteholle KL-akun omia rajoitteita tiukemman rajoitteen.

KL-akun latauksen- ja purkamisen oletetaan teoriassa alkavan heti suunnitellulla teholla. Todellisuudessa KL-akun käytön aloituksessa ja lopetuksessa käytetään rampitusta, jolloin lämmöntuotantoteho muuttuu rauhallisemmin KL-akun ja kaukolämpötuotannon komponentteihin kohdistuvan rasituksen pienentämiseksi. Tästä johtuen käytön aloitukseen ja lopetukseen syntyy viive, ja käytön aloitus- ja lopetushetkillä käyttöteho on suunniteltua pienempää.

KL-akkuun varastoitavan veden lämpötila ei saa ylittää suunniteltua maksimikäyttölämpötilaa. Paineistamattomien tai vähän paineistettujen KL-akkujen maksimikäyttölämpötila on pienempi kuin kaukolämpöverkoissa käytettävä maksimilämpötila 115 C. [19] Tällöin KL-akkua ei voida ladata, kun kaukolämpöverkon menoveden lämpötila ylittää suurimman sallitun käyttöveden lämpötilan. Jos menovettä ei ole mahdollista suntata ennen KL-akkua, menoveden lämpötila on huomioitava KL-akun käytön suunnittelussa rajoitteena.

Varastoitavan lämpöenergian määrässä on myös rajoitteita. KL-akun maksimivaraus riippuu KL-akun tilavuudesta sekä varastoidun veden ja kaukolämmön paluuveden entalpiaerosta. Maksimivaraus on laskettava näiden suureiden avulla ja huomioitavana rajoitteena. Maksimivarausta ei voi olettaa kiinteäksi, vaan se on riippuvainen lataamisessa käytetyn kaukolämmön menoveden lämpötilasta. Jotta suunniteltu käyttö voidaan toteuttaa, tulee maksimivarausta käsitellä dynaamisena rajoitteena, joka vaihtelee kaukolämmön menoveden lämpötilan mukaan.

Teoriassa KL-akulla ei ole minimivarausten rajoitetta. Silti on mahdollista, että kaukolämmön paluuveden lämpötilan noustessa KL-akun varaus pienenee. Tällöin voidaan joutua tilanteeseen, jossa suunniteltua KL-akun käyttöä ei ole mahdollista toteuttaa, koska liian pienen lämpötilaeron vuoksi suunnitellun tehon tuottamiseksi tarvittava massavirta nousee yli pumppujen maksimikapasiteetin. Jotta tilanteelta vältytään, voidaan KL-akulle asettaa suunnittelussa minimivaraus, joka toimii puskurina edellä kuvattua tilannetta varten. Näin KL-akun suunniteltu käyttö pysyy toteutettavissa myös KL-akkua käytettäessä matalilla varaustasoilla.

2.4.2 Kaukolämpötuotannon prosessirajoitteet

KL-akun käytöllä ei voida hetkittäisesti korvata CHP-laitoksen lämmöntuotantoa kokonaan, koska CHP-laitokselle on taattava aina minimitehonsa verran tuotantoa, jotta CHP-tuotannossa ei esiinny häiriöitä. Näin ollen KL-akun käyttöä suunniteltaessa on huomioitava tarvittavan kaukolämpökuorman suuruus CHP-laitoksen minimikuormarajoitteen täyttämiseksi. Vastaavasti KL-akkua lataamalla ei kannata kasvattaa tarvittavaa kaukolämpötehoa yli CHP-laitoksen maksimikaukolämpötehon, koska silloin osa lämmöstä täytyisi tehdä kalliilla apukattiloilla.

Suunniteltaessa KL-akun käyttöä etukäteen, kaukolämpökuormien arvot perustuvat ennusteisiin. Jos ennusteissa esiintyy virheitä, voidaan ajautua tilanteisiin, jossa KL-akun käytöllä kaukolämpöteho ylittää tai alittaa CHP-laitoksen tuotantorajoitteet. Tällöin KL-akkua täytyy poikkeuttaa suunnitellusta tai tuotanto palauttaa CHP-laitoksen toiminta-alueelle apujäähdytyksen tai -kattilan avulla. Kummassakin tapauksessa tuotannon käyttökustannuksiin syntyy lisäkustannuksia.

Kun kaukolämpökuormat ovat hyvin korkeat tai matalat, voidaan joutua optimaalisesta KL-akun käytöstä huolimatta turvautumaan apujäähdytyksen tai -kattiloiden käyttöön. Silloin tulee huomioida myös näiden laitteiden rajoitteet, kuten minimitehon tai minimi päällä oloajan rajoitteet. [20 s. 152]

KL-akun käyttö vaikuttaa kaukolämpöverkon paineisiin ja virtauksiin. Kaukolämpöverkon maksimipaine voi olla rajoittava tekijä KL-akkua purettaessa. Vastaavasti KL-akkua ladattaessa, eli kun KL-akku toimii kulutuskohteen tavoin, voi kaukolämpöverkon virtauksen synnyttävän kaukolämpöpumpun maksimikapasiteetti rajoittaa käytettävän lataustehon suuruutta. Molemmat tilanteet voidaan usein välttää, jos kaukolämpöverkon käyttöparametrien suunnittelussa huomioidaan KL-akun suunniteltu käyttö, eli optimointi suoritettaisiin järjestelmätasolla.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

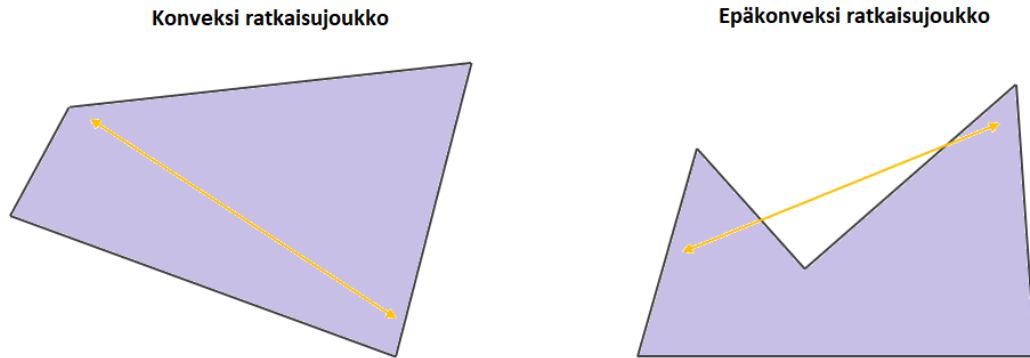
Tässä luvussa määritellään KL-akun käytön suunnittelussa ja optimoinnissa käytettävät menetelmät. Luvussa selvitetään käytettyjen menetelmien valitsemiseen johtaneet perustelut sekä menetelmien soveltaminen tutkimuskohteeseen ja -ongelmiin.

Luvussa 4.1 esitetään optimointimallin muodostamisessa käytettävä menetelmä sekä optimointimallissa tehtävät oletukset ja käytettävät matemaattiset yhtälöt. Seuraavaksi luvussa 4.2 esitellään liukuvan aikaikkunan menetelmä, ja sen soveltaminen yhdessä optimointimallin kanssa. Viimeiseksi käydään läpi mallin ratkaisemisessa käytetty tekniikka.

3.1 Optimointimallin muodostaminen

KL-akun lyhyen aikavälin suunnitteluongelman ratkaisemiseksi koko CHP-systeemi on kuvattava matemaattisesti. Matemaattinen mallinnus perustuu systeemiä kuvaavien yhtälöiden muuttamisesta tavoitefunktiksi ja rajoiteyhtälöiksi. Sopivimman matemaattisen mallinnusluokan määrittävät systeemin rakenteelliset ominaisuudet, kuten lineaarisuus ja aikariippuvuus.

CHP-tuotanto kaukolämpöakkuineen on epälineaarinen aikajatkuva systeemi. Usein aikajatkuva systeemi mallinnetaan diskretoimalla se sarjaksi staattisia malleja. Epälineaarisuutta sen sijaan voidaan mallintaa jakamalla CHP-laitoksen toiminta-alue osiin, ja oletamalla osien sisäinen käyttäytyminen lineaariseksi. Epälineaarisuus ja kaukolämmön tuotannossa tehtävät päätökset akun purkamisesta ja lataamisesta sekä huippulaitosten käynnistämisestä ja sammuttamisesta tekevät optimointiongelman ratkaisujoukosta epäkonveksin. [15] Konveksissa ratkaisujoukossa ratkaisu voi olla mikä tahansa konveksin alueen reunapisteiden välissä sijaitseva piste. Sen sijaan epäkonveksissa ratkaisujoukossa alueen reunapisteiden välillä voi olla pisteitä, jotka eivät täytä ratkaisujoukon kriteereitä. Systeemin aikajatkuvuudesta ja epäkonveksisuudesta johtuen KL-akun käytön suunnittelu päätettiin mallintaa monijaksoisella MILP-mallilla. Kuvassa 9 on havainnollistettu konveksin ja epäkonveksin ratkaisujoukon ero. [28]



Kuva 9. Konveksin ja epäkonveksin ratkaisujoukon ero.

MILP on lineaaristen optimointiongelmiä alaluokka, jossa osa muuttujista määritetään kokonaisluvuiksi. Tämä ominaisuus mahdollistaa epäkonveksien tavoiteyhtälöiden tai karakteristikoiden jakamisen lineaarisiksi alaosiksi. MILP ongelma yleisessä muodossa on esitetty kaavoissa (4-1 – 4-4).

$$\min (cx + dy), \quad (4-1)$$

$$s. t. Ax + By \leq b, \quad (4-2)$$

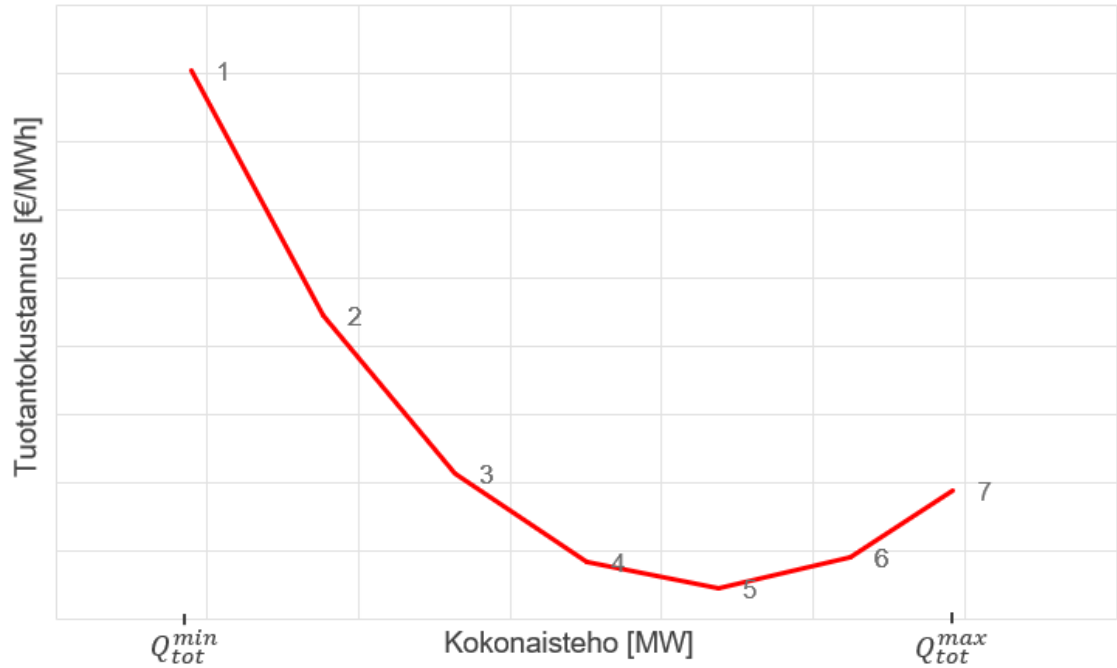
$$x_i \geq 0, \forall i \in I, \quad (4-3)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in J, \quad (4-4)$$

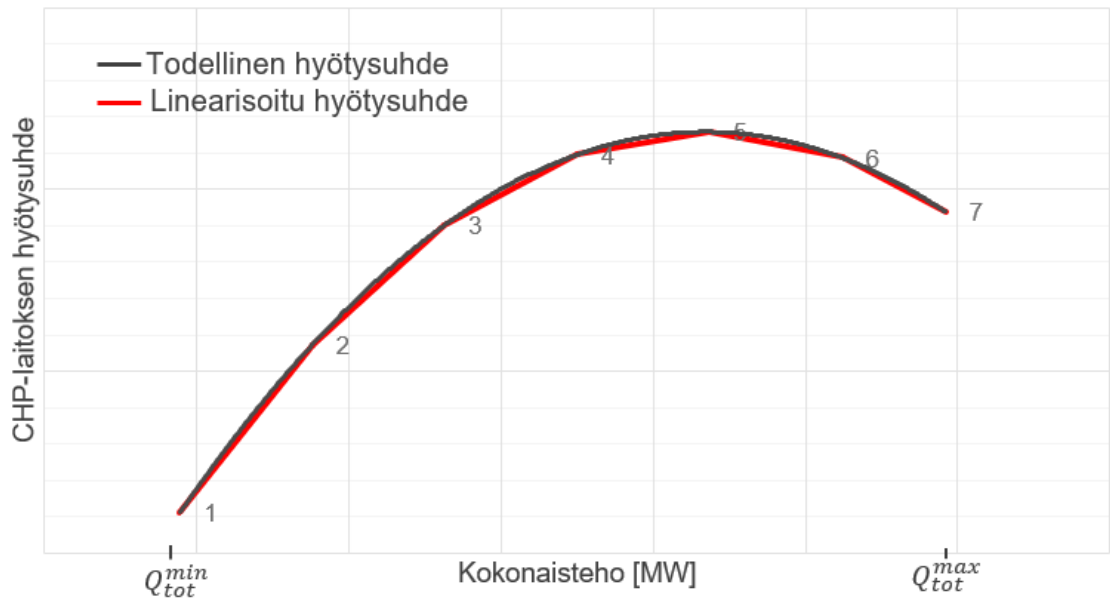
jossa (4-1) on tavoitefunktio, (4-2) kuvaa rajoiteyhtälöitä, x_i :t ovat muuttujia ja y_i :t ovat binäärimuuttujia. [29]

Monijaksoinen MILP on MILP-ongelman erikoisrakenne, jossa aikahorisontti jaetaan useaan aikajaksoon. Jokaisen aikajakson käyttäytyminen mallinnetaan staattisena MILP ongelmana, ja aikajaksot kiinnitetään toisiinsa aikajatkuvilla rajoitteilla koko optimointi-horisontin yli.

Usein vastapainevoimalaitoksien tuotannon optimoinnissa oletetaan, että kustannukset kasvavat lineaarisesti laitoksen tehon suhteen. Tämä ei kuitenkaan vastaa todellisuutta, jossa laitoksen rakennusasteen sekä hyötysuhteen muutokset eivät ole lineaarisia tehon suhteen. Tämä johtaa CHP-karakteristikan epälineaarisuuteen, jolloin laitoksen malli on epäkonvekksi. Epäkonveksia mallia voidaan jäljitellä jakamalla epälineaarinen käyttäytyminen useaan lineaariseen osaan. Näin pystytään tekemään MILP-malli, joka jäljittelee prosessin epälineaarisuuksia. Kuvassa 10 on havainnollistettu kuvan 8 esittämän epälineaarisen käyttökustannuskäyrän linearisointi ja kuvassa 11 on esitetty CHP-laitoksen hyötysuhde ja sen linearisointi CHP-laitoksen kokonaistehon suhteen. Linearisoinnit on suoritettu 7 toimintapisteen välillä.



Kuva 10. Kuvan 8 esittämän CHP-laitoksen tuotantokustannus linearisoituna.



Kuva 11. CHP-laitoksen hyötysuhteen todellinen ja linearisoitu käytös kokonaistehon suhteen.

MILP-ongelmien ratkaisuisissa löydetään kaikki ratkaisujoukon lokaalit optimit, joten saatu tulos on globaali optimi. Epälineaarisen ongelman ratkaisussa globaali optimi voi sijaita alueella, joka rajautuu linearisoinnin myötä pois tarkastelusta. Täten saatu ratkaisu ei välttämättä ole globaali optimi. Tässä työssä osittaislinearisoidusta mallista saatua ratkaisua pidetään riittävän optimaalisena ratkaisuna, eikä saadulle ratkaisulle siten tehdä lisätarkasteluita. [29]

Ensimmäiseksi tämän luvun alaluvuissa esitellään mallin muodostamisessa käytettävät oletukset. Seuraavaksi käydään läpi mallin sisältämät parametrit ja päätösmuuttujat. Tämän jälkeen muodostetaan systeemin optimointiin tavoitefunktio, jonka arvoa pyritään minimoimaan KL-akun käytöllä. Lopuksi prosessin toiminta-alue ja tekniset rajoitteet mallinnetaan rajoiteyhtälöillä. Esiteltävä malli sisältää yhden CHP-laitoksen, lämpölaitoksen, apujäähdyttimen ja KL-akun. Tarvittaessa malli on helposti laajennettavissa, jos esimerkiksi lämpölaitoksia on useampia.

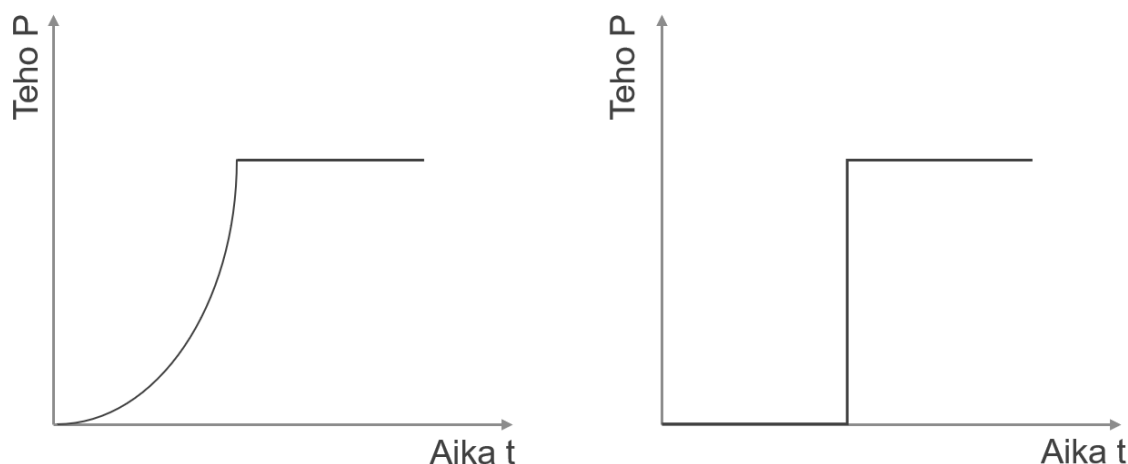
3.1.1 Oletukset

Lineaarisuuden säilyttämiseksi CHP-prosessin ja KL-akun käyttäytymiseen on tehtävä useita oletuksia. Tässä työssä tehtävät oletukset ovat:

- CHP-laitoksen karakteristika oletetaan osittain lineaariseksi.
- KL-akun käytön aloitus- ja lopetusrampitukset oletetaan viiveelliseksi askelvas-teiksi.
- Minimikäyttöteho oletetaan vakioarvoksi.
- KL-akun käyttö lyhyen aikavälin lämmön varastoinnissa oletetaan häviöttömäksi.
- KL-akun varauksen ei oleteta riippuvan meno- tai paluuveden lämpötilavaihte-luista.

Tärkein oletus prosessin optimoinnin kannalta on CHP-laitoksen karakteristikan oletta-minen osittain lineaariseksi. Tällöin mallissa jaetaan CHP-laitoksen karakteristika 6 alu-eseen, joiden päätepisteiden välien oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti. Karakteristi-kassa alin toimintapiste on CHP-kattilan miniminettoteho ja CHP-laitoksen oletetaan op-timoinnissa olevan aina päällä. Apujäähdytyksen vaikutus toimintapisteeseen otetaan ka-rakteristikassa huomioon, mutta karakteristikan yksinkertaistamiseksi apujäähdytyksen lisäkustannuksia ei ole sisällytetty karakteristikaan, vaan apujäähdytyksen kustannus ote-taan huomioon tavoiteyhtälössä.

Mallissa halutaan ottaa myös huomioon KL-akun latauksen tai purkamisen aloitus- ja lo-petuskustannukset. Tässä mallissa nämä kustannukset on ajateltu syntyvän viiveestä, joka johtuu KL-akun lataus- tai purkupumppauksen aloitus- ja lopetusrampituksista. Rampitus on eksponenttifunktio, joka yksinkertaistetaan mallissa viiveelliseksi askelvasteeksi. To-dellisen käytön aloituksen rampitus ja mallinnettu rampitus on havainnollistettu kuvassa 12. Kustannuksen suuruus on riippuvainen aloitus- tai lopetustunnin KL-akun käyttöte-hosta, mutta tämän tehon käyttäminen kustannuksen laskemisessa tekisi mallista epäline-aarisen. Tämän johdosta mallissa käytetään tarkasteltavan ajanjakson KL-akun käyttöte-hon keskiarvoa, joka kerrotaan kustannuskertoimella mahdollisimman tarkan arvion saa-vuttamiseksi.



Kuva 12. Oikean KL-akun käytön rampitusfunktion ja mallinnetun rampituksen ero.

Minimikäyttötehon oletetaan pysyvän koko ajan samana huolimatta kaukolämpöverkon meno- ja paluulämpötiloista. Tosiasiassa matalilla kuormilla KL-akkaa pystyttäisiin käyttämään pienemmällä teholla kuin suurilla kuormilla, koska kaukolämpöverkon meno- ja paluuveden lämpötilaero on silloin pienempi. Optimointimallissa minimikäyttötehona päätettiin kuitenkin käyttää vakioarvoa, koska kaukolämpöveden lämpötilaeroa olisi käytännössä vaikea ennustaa usean vuorokauden pituiselle ajalle.

KL-akun käyttö oletetaan mallissa hyötysuhteeltaan ideaaliseksi. Tämä tarkoittaa, että lämmön lyhytaikaisessa varastoinnissa tai lämmön purkamisessa ja lataamisessa ei oleteta syntyvän lämpöhäviöitä. Lisäksi CHP-laitoksen kesäseisokin aikana ei KL-akussa ei oleteta tapahtuvan lämpöhäviötä.

KL-akun varauksen suuruuden oletetaan pysyvän samana, vaikka menoveden tai paluuveden lämpötilat vaihtelevat. Samoin KL-akun käytön aloituksessa ja lopetuksissa tapahtuvia viiveitä ei huomioida varausta laskettaessa, vaan aloitus- ja lopetustuntien käyttötehojen oletetaan olevan keskimäärin samansuuruisia optimoitavalla aikajaksolla. Tällöin viiveiden vaikutukset KL-akun varaukseen kumoavat toisensa.

Monet tehtävät oletukset liittyvät KL-akun käytön ja CHP-tuotannon epälineaarisuuksien esittämiseen osittain lineaarisina, ja siten ongelman pitämiseen ratkaistavana lineaarisilla menetelmillä. Tarkempi mallinnus, ja siten parempi optimointi, voitaisiin saavuttaa epälineaarisella optimointimallilla. Erityisesti epälineaarinen malli parantaisi KL-akun lataus- ja purkupumppauksen kustannuksien esittämistä, kun KL-akun käytön aloitus- ja lopetuskustannuksissa voitaisiin huomioida KL-akun käyttöteho aloitus- tai lopetustunnilla.

3.1.2 Parametrit ja muuttujat

MILP-malli sisältää kiinteitä parametreja ja muuttujia. Kiinteät parametrit voivat olla joko aikaan sidottuja arvoja tai vakioarvoja. Ajasta riippuville parametreille määritetään

arvo jokaiselle aikasarjan T hetkelle t . Vastaavasti muuttujille määritetään optimoinnissa arvo jokaiselle aikasarjan hetkelle parhaan mahdollisen tuloksen saavuttamiseksi. Indeksillä t :n avulla ilmaistaan muuttujan tai parametrin arvo vastaavalla hetkellä. Muuttujat voivat olla joko päätösmuuttujia tai apumuuttujia.

Kiinteät parametrit ovat tarkastelevasta kohteesta riippuvaisia optimointimallin sisäänmenoarvoja, jotka kuvaavat systeemin sen hetkistä toimintapistettä tai -ympäristöä. Kiinteät parametrit muodostuvat kaukolämmöntarpeesta, systeemin teknisistä parametreista sekä taloudellisista parametreista, kuten muuttuva käyttökustannus ja sähkönmarkkinahinta. Optimoija ei voi vaikuttaa näiden arvojen suuruuteen laskennassaan. Osa arvoista vaikuttavat systeemin tila ja ajanhetki. Nämä parametrit ovat aikariippuvaisia parametreja. Osa sisäänmenoarvoista ovat vakioita ajanhetkestä tai tilanteesta riippumatta. Malliin syötettävät parametrit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Optimointimalliin syötettävät parametrit.

| Parametrit | |
|------------------------|---|
| Q_{dh}^t | Kaukolämmöntarve hetkellä t (MW) |
| c_p^t | Elspot-sähkön hinta hetkellä t (€/MWh) |
| Q_{CHP}^{max} | CHP-laitoksen maksimikaukolämpöteho (MW) |
| Q_{CHP}^{min} | CHP-laitoksen minimikaukolämpöteho (MW) |
| C_{CHP}^t | CHP-laitoksen käyttökustannus (€/MWh) |
| q_{fgs}^t | savukaasupesurin teho ajanhetkellä t (MW) |
| Q_{HOB}^{max} | Apukattilan maksimikaukolämpöteho (MW) |
| Q_{HOB}^{min} | Apukattilan minimikaukolämpöteho (MW) |
| Δt_{HOB}^{min} | Apukattilan minimikäyttöaika (h) |
| c_{HOB}^t | Apukattilan tuotantokustannus (€/MWh) |
| Q_{aux}^{max} | Apujäähdytyksen maksimilämpöteho (MW) |
| c_{aux} | Apujäähdytyksen käyttökustannus (€/MWh) |
| q_s^{max} | KL-akun maksimikäyttöteho (MW) |
| q_s^{min} | KL-akun minimikäyttöteho (MW) |
| T_{ss}^t | Kaukolämmön menoveden lämpötilaennuste hetkellä t (C) |
| T_s^{max} | KL-akun käyttöveden maksimilämpötila (C) |
| S_q^0 | KL-akussa oleva varaus optimointijakson alussa (MWh) |
| $S_q^{t,max}$ | KL-akun maksimivaraus hetkellä t (MWh) |
| S_q^{min} | KL-akun minimivaraus (MWh) |
| $c_{start/stop}$ | KL-akun käytön aloitus- tai lopetuskustannus ajanhetkellä t (€) |
| T | Liukuvan aikaikkunan pituus (h) |

Parhaaseen mahdolliseen tulokseen päästäkseen optimointimalli valitsee jokaiselle päätösmuuttujalle parhaan arvon ratkaisujoukosta. Päätösmuuttujien ala- ja ylärajat voivat olla vakioita tai riippuvaisia muista suureista ja ajanhetkestä. Päätösmuuttujien arvo ha-

lutaan ratkaista tavoitefunktion minimoimiseksi tai maksimoimiseksi. Mallissa päätösmuuttujia ovat KL-akun purkuteho q_{s-}^t , KL-akun latausteho q_{s+}^t , CHP-laitoksen apujäähdyttimen teho q_{aux}^t ja öljylaitoksen teho q_{HOB}^t . Näiden päätösmuuttujien avulla optimointimalli määrittää epäsuorasti myös CHP-laitoksen kaukolämpötehon. KL-akun purku- ja latausteho ovat varsinaiset päätösmuuttujat, joiden arvo halutaan ratkaista KL-akun käytön suunnittelussa. Apujäähdyttimen ja öljylaitoksen tehot ovat päätösmuuttujia, jotka tekevät optimointiongelmasta ratkaistavissa olevan jokaisella kaukolämpöverkon tehotarpeella. Apujäähdyttimen ja öljylaitoksen käytön optimoinnilla voidaan parantaa CHP-tuotannon kannattavuutta, esimerkiksi korkean sähköhinnan tunneilla, mutta aihe on tämän tutkimuksen aihepiirin ulkopuolella.

Apumuuttujien avulla pyritään kuvaamaan prosessien epäjatkuvuuksia ja -lineaarisuuksia, esimerkiksi CHP-laitoksen tilapistettä tai KL-akun käytön aloitus- ja lopetuskustannuksia. Apumuuttujat ovat joko binäärilukuja, joiden arvo on 0 tai 1 tai liukulukuja, joiden arvo on vähintään 0 tai suurempi, mutta enintään 1 tai pienempi. Mallin sisältämät muuttujat on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Optimointimallin sisältämät muuttujat.

| Muuttujat | |
|--------------|--|
| q_{s+}^t | KL-akun latausteho hetkellä t (MW) |
| q_{s-}^t | KL-akun purkuteho hetkellä t (MW) |
| Q_{HOB}^t | Apukattilan kaukolämpöteho hetkellä t (MW) |
| Q_{aux}^t | Apujäähdytysteho hetkellä t (MW) |
| a_i^t | Binäärimuuttuja CHP-laitoksen toiminta-alueen aktiivisen osa-alueen määrittämiseksi hetkellä t , $i \in I_a$ |
| x_i^t | Määritysmuuttuja CHP-laitoksen toimintapisteen muuttamiseksi alueen a_i^t päätepisteiden konveksikombinaatioksi hetkellä t , $i \in I_x$ |
| y_{s+}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun lataus päällä hetkellä t |
| yu_{s+}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun lataus alkanut hetkellä t |
| yd_{s+}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun lataus loppunut hetkellä t |
| y_{s-}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun purku päällä hetkellä t |
| yu_{s-}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun purku alkanut hetkellä t |
| yd_{s-}^t | Binäärimuuttuja, KL-akun purku loppunut hetkellä t |
| y_{HOB}^t | Binäärimuuttuja, apukattila päällä hetkellä t |
| yu_{HOB}^t | Binäärimuuttuja, apukattilan käyttö alkanut hetkellä t |
| yd_{HOB}^t | Binäärimuuttuja, apukattilan käyttö loppunut hetkellä t |

Muuttujien x_i^t ja a_i^t avulla CHP-laitoksen toimintapiste kuvataan karakteristikasta määritettyjen tilapisteiden x_i konveksikombinaationa. Tilapistet kertovat laitoksen netto-
lämpö-, nettosähkötehon ja käyttökustannuksen ($q_i, p_i, q_i, i \in I_x$) kyseissä pisteessä. Muuttujat a_i kuvaavat laitoksen karakteristikasta otettuja tilapisteiden välisiä osia, jotka li-

nearisoivat laitoksen tiettyä toiminta-aluetta. Jotta optimoinnin muodostavat konveksikombinaatiot pysyvät laitoksen toiminta-alueella, a_i muuttujat määrittävät konveksikombinaatioiden muodostamiseen käytettävissä olevat tilapisteet hetkellä t . CHP-laitos voi toimia tämän toiminta-alueen a_i päätepisteissä x_i , ja missä tahansa pisteessä päätepisteiden välisellä janalla.

3.1.3 Tavoitefunktio

Optimoinnin tavoitteena on minimoida CHP-systeemin käyttökustannuksia optimointihorisontin yli. Käyttökustannukset muodostuvat tuotannon muuttuvista kustannuksista sekä sähkön myynnistä saatavista tuotoista. Kiinteitä kustannuksia ei ole huomioitu tavoitefunktiossa (4-5), koska kiinteät kustannukset eivät ole riippuvaisia KL-akun käytön suunnittelusta.

$$\min J = \sum_{t=1}^T (C_{chp}^t + Q_{HOB}^t c_{HOB} + Q_{aux}^t c_{aux} + C_{start/stop}^t - P_{chp,net}^t c_p^t), \quad (4-5)$$

jossa J on toteutunut käyttökustannus T pituisen optimointihorisontin yli ja $P_{chp,net}^t$ on CHP-laitoksen nettosähköteho hetkellä t . Tavoitefunktion C_{chp}^t ja $P_{chp,net}^t$ muodostuvat kaavojen (2-6) ja (2-7) mukaisesti konveksikombinaatioiden avulla.

$$C_{chp}^t = \sum_{i \in I} c_i^t x_i^t \quad (4-6)$$

$$P_{chp,net}^t = \sum_{i \in I} p_i^t x_i^t, \quad (4-7)$$

jossa c_i^t on tuotantokustannus ja p_i^t on laitoksen nettosähköteho CHP-karakteristikan pisteessä x_i^t . Tavoitefunktion $C_{start/stop}^t$ on KL-akun käytön aloitus- tai lopetuskustannus, ja sen muodostuminen on kuvattu kaavassa (4-8).

$$C_{start/stop}^t = c_{start/stop} (yu_{s+}^t + yd_{s+}^t + yu_{s-}^t + yd_{s-}^t) \quad (4-8)$$

3.1.4 Lämpö- ja energiataseet

Tässä alaluvussa esitellään systeemin taseyhtälöt, joihin tavoitefunktio ja rajoiteyhtälöt perustuvat. Lämpötaseella (4-9) varmistetaan kaukolämpöverkon tehotarpeen täyttämisen jokaisella ajan hetkellä.

$$Q_{chp}^t + Q_{HOB}^t = Q_{dh}^t, \quad (4-9)$$

jossa Q_{chp}^t on CHP-laitokselta kaukolämpöverkkoon siirtyvä kaukolämpöteho, johon sisältyy sekä savukaasupesurin lämpöteho $q_{f_{gs}}^t$ että KL-akun käyttötehot q_{s+}^t ja q_{s-}^t . Mallissa oletetaan, että KL-akun varaus tietyllä hetkellä t voidaan muodostaa edellisen tunnin

varauksesta ja tunnilla t tapahtuvan lataamisen sekä purkamisen avulla kaavan (4-10) mukaisesti. KL-akun lämpöhäviöt ovat lyhytaikaisessa varastoinnissa häviävän pieniä [14], joten KL-akun lämmönvarastoinnin hyötysuhde oletetaan ideaaliseksi.

$$S_q^t = S_q^{t-1} + q_{s+}^t - q_{s-}^t, \quad (4-10)$$

jossa S_q^t on KL-akun varaus tunnin t lopussa.

3.1.5 Rajoiteyhtälöt

Rajoiteyhtälöiden tarkoitus on mallintaa mahdollisimman tarkasti optimoitavan systeemin toiminta-alue, jotta optimoinnin tulokset ovat käytettävissä prosessin ohjauksessa. Optimointiongelman ratkaisujoukko on rajoiteyhtälöiden avulla mallinnettu systeemin toiminta-alue.

CHP-laitoksen kaukolämmöntuotantokapasiteetti on huomioitava mallissa. CHP-tuotannon maksimi- ja minimituotannot ovat huomioitu mallissa rajoitteina yhtälöiden (4-11) ja (4-12) mukaisesti.

$$Q_{dh}^t + q_{s+}^t - q_{s-}^t - q_{fgs}^t + q_{aux}^t - q_{oil}^t \leq Q_{boiler}^{max} \quad (4-11)$$

$$Q_{dh}^t + q_{s+}^t - q_{s-}^t - q_{fgs}^t + q_{aux}^t - q_{oil}^t \geq Q_{boiler}^{min} \quad (4-12)$$

Tilanteissa, joissa kaukolämpöverkon lämmöntarve nousee yli CHP-systeemin maksimituotannon, malli olettaa erotuksen tuotettavan apukattilalla. Erotus voi olla arvoltaan pieni, huomattavasti alle vara- tai huippulaitoksena toimivan apukattilan minimilämpötehon. Samoin lisälämmöntarvetta saattaa esiintyä yksittäisinä tunteina, mutta apukattilan käyttäminen yhden tunnin ajan ei ole usein käytännössä järkevää tai edes mahdollista. Tämän takia yhtälöillä (4-13) ja (4-14) rajoitetaan apukattilan minimi- ja maksimilämpöteho sekä minimikäynnissäpitoaika apumuuttujien yu_{HOB}^t ja yd_{HOB}^t avulla.

$$Q_{HOB}^{min} \leq Q_{HOB}^t \leq Q_{HOB}^{max} \quad (4-13)$$

$$yd_{HOB}^t \leq 1 - yu_{HOB}^{t-z}, z = 1, \dots, \Delta t_{HOB}^{min} \quad (4-14)$$

CHP-laitoksen apujäähdyttimelle sen sijaan ei aseteta mallissa vastaavanlaisia minimitehon tai -käynnissäpitoajan vaatimuksia, joten apujäähdyttimen käyttöä rajoitetaan ainoastaan maksimitehon rajoitteella (4-15).

$$Q_{aux}^t \leq Q_{aux}^{max} \quad (4-15)$$

KL-akun operointia rajoittaa KL-akun lämmönvarastoinnin sekä lataus- ja purkutehon ala- ja ylärajat. KL-akun lämmönvarastointirajoitteella (4-16) varmistetaan, että KL-ak-

kuun varastoitu lämpöenergia pysyy KL-akun maksimi- ja minimikapasiteetin välillä. Rajoiteyhtälöt (4-17) ja (4-18) pitävät lataus- ja purkutehon alle asetetun KL-akun maksimikäytötehon. Lisäksi KL-akkua ei voida ladata, jos kaukolämpöverkon menoveden lämpötila ylittää KL-akun maksimikäyttölämpötilan rajoitusarvon (4-19).

$$S_q^{min} \leq S_q^t \leq S_q^{t,max} \quad (4-16)$$

$$q_{s+}^t \leq q_s^{max} \quad (4-17)$$

$$q_{s-}^t \leq q_s^{max} \quad (4-18)$$

$$y_{s+}^t T_{ss}^t \leq T_s^{max} \quad (4-19)$$

Aiemmissä tutkimuksissa ([14], [15]) lataus- ja purkutehon annetaan vaihdella nollan ja maksimitheon välillä. Todellisuudessa minimilatausteho on nollaa suurempi, koska lataus- ja purkupumpuissa esiintyisi kavitaatiota liian pienillä tehoilla käytettäessä. Tämän vuoksi malliin lisättiin rajoitteet (4-20) ja (4-21) lataus- ja purkutehon minimistä KL-akkua ladattaessa tai purettaessa.

$$q_{s+}^t \geq q_s^{min} y_{s+}^t \quad (4-20)$$

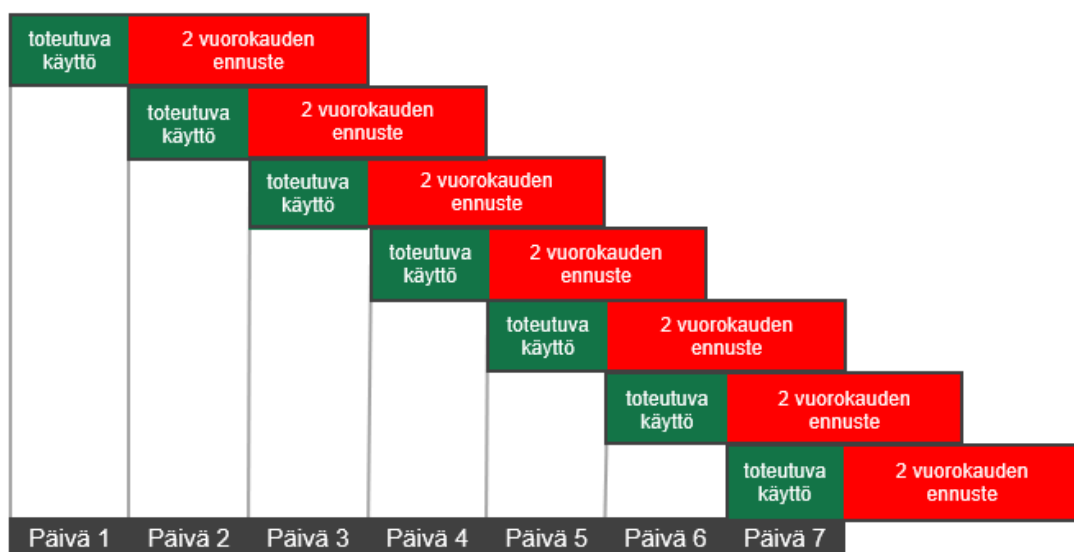
$$q_{s-}^t \geq q_s^{min} y_{s-}^t \quad (4-21)$$

3.2 Liukuvan aikaikkunan menetelmä

Ratkaistaessa kustannusfunktio perusteista MILP-ongelmaa, optimointimalli pyrkii minimoimaan kustannukset optimoitavalla aikavälillä eli ennustehorisontilla. Tästä johtuen optimointimallin mielestä optimaalinen tulos on sellainen, jossa kaikki akkuun varastoitu energia onnistutaan käyttämään ennustehorisontin aikana, eli KL-akku on tyhjä ennustehorisontin lopussa. Käytännössä tämä johtaa ongelmiin, kun siirrytään optimoimaan seuraavaa tuotannon ajanjaksoa ja KL-akku on systemaattisesti tyhjä lähtötilanteessa. Tällöin lyhyen aikavälin käytön suunnittelussa ajaudutaan epäoptimaaliseen tilanteeseen, kun varastoitavaa lämpöä joudutaan tuottamaan epäedullisella sähkönhinnan hetkellä tai huipulaitoksia joudutaan käynnistämään turhaan.

Lyhyen aikavälin operoinnin suunnittelussa KL-akun lyhyen aikavälin käyttö optimoidaan hyödyntäen liukuvan aikaikkunan menetelmää, jota Fang ym. (2015) sovelsivat tutkimuksessaan KL-akun sisältävän CHP-systeemin optimointiin. Menetelmässä optimoidaan ensin CHP-systeemin operointi ja KL-akun käytön ajoitus ennustehorisontin pituiselle ajanjaksolle lämmöntarpeen ja sähkönhinnan ennusteiden perusteella. Saadusta optimaalisesta tuloksesta otetaan käyttöön aikaikkunan ensimmäiselle vuorokaudelle saadut KL-akun optimaaliset ajoasetukset. Nämä ajoasetukset ovat KL-akun ensimmäisen päi-

vän suunniteltu käyttö. Tämän jälkeen aikaikkunaa siirretään yksi päivä eteenpäin, ja prosessi toistetaan. Käytettävä menetelmä 3 vuorokauden mittaisella aikaikkunalla viikon pituiselle ajanjaksolle on esitetty graafisesti kuvassa 13.



Kuva 13. Liukuvan aikaikkunan menetelmä sovellettuna viikon aikajaksolle. Aikaikkunan pituus 3 vuorokautta.

Mallissa voidaan ottaa myös huomioon suunniteltu CHP-laitoksen alasajo, jolloin liukuva aikaikkuna pysähtyy ilmoitettuun alasajo hetkeen. Tällöin malli ajaa KL-akun mahdollisimman tyhjäksi ennen CHP-laitoksen alasajoa tai heti sen jälkeen. Näin saadaan optimaalinen käyttökustannus CHP-laitokselle sekä minimoitua alasajon aikana tapahtuva lämpöhäviö KL-akussa. Vaihtoehtoinen tapa voisi olla myös mallin muokkaaminen minimoimaan kalliimpien varalaitoksien tuotantoa, ja siten koko systeemin tuotantoa, CHP-laitoksen ollessa alhaalla. Tämä vertailu ei kuitenkaan ole oleellista tässä tutkimuksessa.

3.2.1 Aikaikkunan pituuden määrittäminen

Tässä tutkimuksessa menetelmän toimivuutta ja sopivinta optimointihorisonttia etsittäessä, liukuvan aikaikkunan menetelmä toistetaan koko tarkasteltavalle ajanjaksolle jokaisella vertailuun valitulla optimointihorisontilla. Käytännössä paras optimointihorisontti on pienimmän kokonaiskäyttökustannuksen aikajaksolle antava horisontti. Todellisuudessa käytettävää mallia tehtäessä painoarvoa on annettava kuitenkin myös ennustetarkkuudelle, ja siten pisin horisontti ei ole aina sopivin.

Aikaikkuna T tulee määrittää jokaiselle systeemille erikseen, koska saatavilla olevat ennusteet ja systeemien koko, ominaisuudet sekä rajoitteet vaikuttavat ratkaisevasti sopivimman aikaikkunan pituuteen. Kun sopivin aikaikkunan pituus käyttökustannuksen ja käytettävissä olevien ennusteiden kannalta on löydetty, toteutetaan optimointi aina valitulla aikaikkunan pituudella T kuvan 13 mukaisesti.

3.3 Optimointiongelman ratkaiseminen

Tavoiteyhtälö (4-5) yhdessä rajoiteyhtälöiden (4-11 – 4-21) muodostavat tuntikohtaisen kaukolämmöntuotannon matemaattisen mallin, jonka optimin ratkaisu on monimutkainen tehtävä. Useat lämmönlähteet ja osittaislinearisoitu CHP-laitoksen karakteristika nostavat binäärimuuttujien, ja siten läpikäytävien mahdollisten ratkaisukombinaatioiden määrän suureksi. Samalla ratkaisun on täytettävä kaikki sille määritetyt rajoitteet. Optimoinnin pitkä aikaikkuna, joka voi CHP-systeemin tuotannonsuunnittelussa vaihdella kymmenistä tunneista yli sataan tuntiin, lisää optimointitehtävän laajuutta.

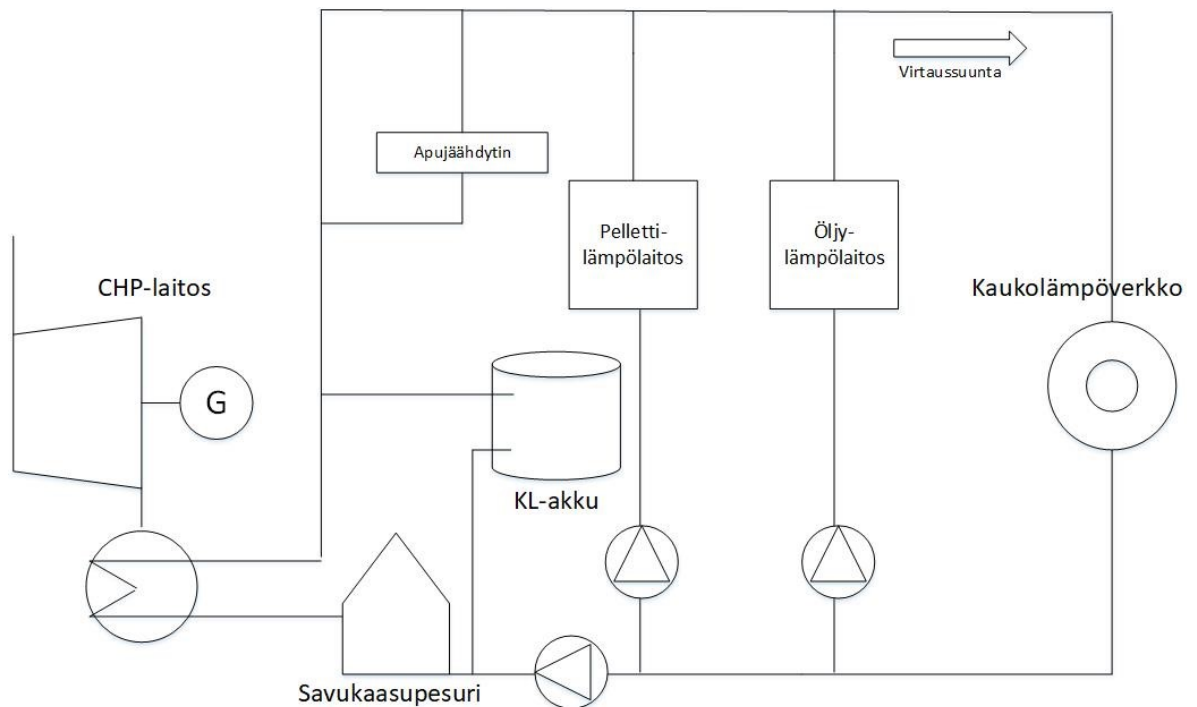
Laskenta-ajan pitämiseksi kohtuullisena, muodostettu MILP-malli ratkaistaan kaupallisella Cplex-ratkaisimella. Ratkaisinta on käytetty onnistuneesti vastaavan MILP-ongelman ratkaisemisessa [10]. Ratkaistaessa tämän työn ongelmaa, Cplex hyväksyy tuloksen optimaaliseksi, kun se on löytänyt käyvän ratkaisun, joka on todistetusti 0.01% päässä optimaalisesta arvosta (eng. relative MIP gap). Hyväksyttävän tuloksen löydettyään ratkaisin lopettaa optimoinnin. Ratkaistessa ongelmaa CPLEX käyttää tehokkaasti Gomoryn leikkaava taso -menetelmää (eng. Gomory's cut) sekä luotaa (eng. probe) binäärimuuttujien vaikutuksia haastavissa optimointimalleissa. [9]

4. CASE FORSSA

Tässä luvussa esitellään Forssan kaukolämmöntuotanto, jonka historiadataa käyttämällä optimointimallin toimivuutta tutkitaan. Tämän jälkeen luvussa 4.2 tehdään data-analyysi, jossa esitellään Forssan KL-akun käytön nykytilanne ja sovitetaan optimointimalli parametreineen soveltumaan Forssan KL-akun käytön suunnitteluun.

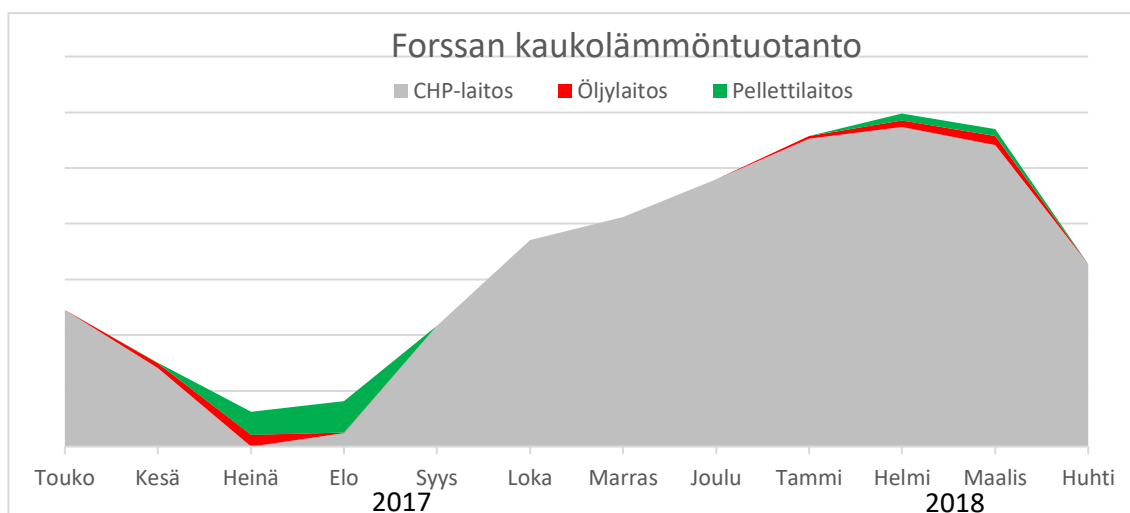
4.1 Forssan kaukolämpötuotanto

Forssan kaukolämpöverkon ja -laitokset omistaa Vapo Oy. Tuotantoa operoidaan etäyhteydellä Vantaalta, jossa sijaitsee Vapon käyttökeskus. Forssan kaukolämpö tuotetaan pääosin Kiimassuon teollisuusalueella sijaitsevilla CHP-laitoksella. Lisäksi kaukolämpöverkkoon on kytketty kaksi vara- ja huippulaitosta, joista toinen on pellettikattila ja öljykattilan sisältävä lämpölaitos ja toinen öljylämpölaitos. Kaukolämpöverkko tuotantolaitoksineen on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Yksinkertaistettu kuva Forssan kaukolämpöverkosta ja -laitoksista.

Forssan kaukolämpöverkko on pituudeltaan 81.5km ja tilavuudeltaan 4000 m³. Kuluttajia verkossa on yli 600. Kuvassa 15 on esitetty kaukolämpöverkkoon tuotettu lämpö laitoksittain.



Kuva 15. Forssan kaukolämpötuotannon jakautuminen eri laitoksille tarkasteltavalla ajanjaksolla.

Forssan CHP-laitosta käytetään peruskuormalaitoksena, joka tuottaa Forssassa tarvittavasta kaukolämmöstä n. 90%. Laitos tuottaa lämpöenergiaa ainoastaan kaukolämpöverkoon. CHP-laitoksen ollessa poissa käytöstä tai kaukolämpötehon ylittäessä CHP-tuotannon maksimikapasiteetin, kaukolämpö tuotetaan vara- ja huippulaitoksilla.

Työn tutkimuksen kannalta oleelliset CHP-laitoksen komponentit ovat leijupetikattila, höyryturbiini, KL-akku, savukaasupesuri, ja apujäähdytin. CHP-laitoksen kattila on leijupetikattila, jonka nimellislämpöteho on 66 MW. Polttoaineena kattilassa käytetään turpeen ja biomassan seosta. Laitoksen höyryturbiinin nimellissähköteho on 17.8 MW ja nimelliskaukolämpöteho kaksivaiheisella lämmönvaihdingärjestelmällä 48 MW. Lämmönvaihdingärjestelmän lisäksi CHP-laitokseen on lisätty vuonna 2015 savukaasupesuri, jonka lämmönvaihtimen nimellislämmöntalteenottoteho on 9.4 MW.

Forssan kaukolämpöakku on rakennettu CHP-laitoksen yhteyteen vuonna 2016. KL-akku on lyhytaikaisvarastointiin tarkoitettu paineistamaton kuumavesivaraaja. KL-akku koostuu eristetyistä teräsrakenteesta, ja on sijoitettu pystyyn maan pinnalle. Forssan KL-akku on kuvassa 16 etualalla, ja sen käyttötekniset tiedot ovat esitetty taulukossa 3.



Kuva 16. Forssan KL-akku (edessä) ja CHP-laitos.

Taulukko 3. Forssan kaukolämpöakun käyttötekniset tiedot.

| | |
|--------------------------------------|------|
| Tilavuus (m ³) | 4000 |
| Käyttölämpötila, mitoitus (C) | 105 |
| Käyttölämpötila, suurin sallittu (C) | 109 |
| Käyttötehon minimi (MW) | 2.5 |
| Käyttötehon mitoitettu maksimi (MW) | 20 |

KL-akku on kytketty kaukolämpöverkkoon suoralla kytkennällä, jossa paine alennetaan venttiilillä ja nostetaan pumpulla. Suoran kytkennän ansiosta KL-akkua pystytään käyttämään myös vara- ja huippulaitoksilla, mutta kannattavat käyttötilanteet CHP-laitoksen ollessa alhaalla ovat harvinaisia. Kaukolämpökuormien tasaamisen ohella KL-akkua käytetään kaukolämpöverkon paisunta- ja paineenpitojärjestelmänä. Näin KL-akku vähentää paineenpitopumppauksen tarvetta ja siihen varastoitua vettä voidaan käyttää lisävetenä suurien kaukolämpövuotojen tapahtuessa.

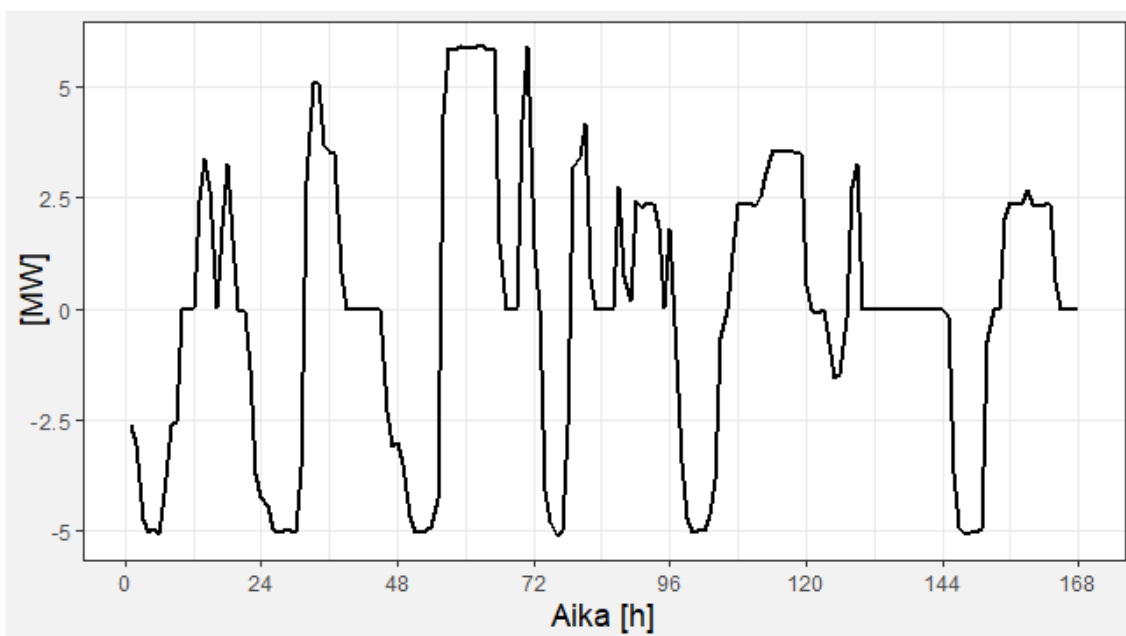
4.2 Data-analyysi

Forssan CHP-tuotantoa ja KL-akun operointia tarkastellaan tuotantodatalla aikavälillä 5/2017 – 4/2018. Toteutuneet tuotantodatat perustuvat Valmet DNA automaatiojärjestelmään tallentuneisiin tietoihin, optimoinnissa käytetyt lämpötehon ennusteet saatiin takautuvasti Vapon tuotannonsuunnittelujärjestelmästä ja KL-akun tekniset tiedot perustuvat toimittajalta saatuihin dokumentteihin.

4.2.1 Nykytilanteen esittely

Forssan KL-akun käytön lyhyen aikavälin suunnittelu toteutetaan ehtolauseisiin perustuvan ajomallin avulla. Tämä ohjaustapa toimii kuitenkin vain kaukolämpökuorman ollessa CHP-laitoksen minimi- ja maksimilämpötehon välissä. Kaukolämpökuorman ollessa matala tai suuri, KL-akun käytön suunnittelusta vastaa voimalaitosoperaattori.

Ajomalli ohjaa KL-akun käytön suunnittelua pelkästään ennustetun sähköhintaprofiilin mukaan kasvattaen tuotettavasta sähköstä saatavaa hintaa. Tästä syystä ajomallin suunnittelemalla käytöllä ei pysty tasaamaan kaukolämpökuorman vaihteluita, ja siten vähentämään kalliiden apukattiloiden tai -jäähdytyksen käyttöä. Kuvassa 17 on esitetty ajomallin suunnittelema ja toteuttama KL-akun käyttö yhden viikon ajalta.



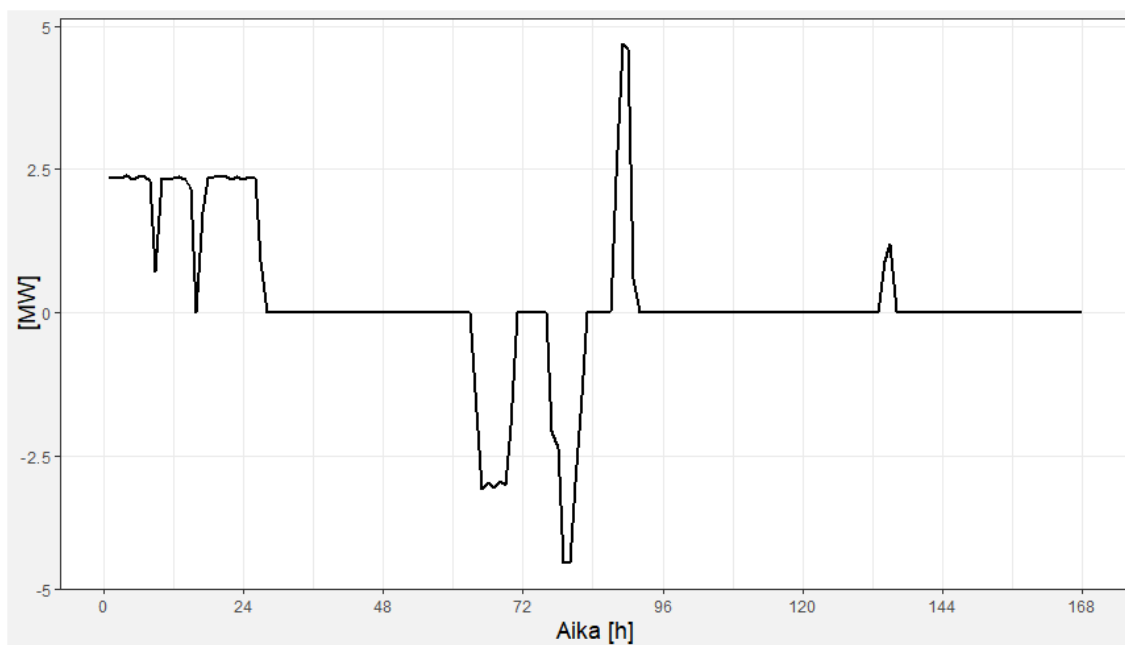
Kuva 17. Ajomalli ohjaama KL-akun käyttö viikolla 18/2017.

Ajomallin ongelmana ovat prosessin heikko mallinnus ehtolauseiden avulla ja useiden yksinkertaistuksien käyttäminen. Näiden ongelmien vuoksi KL-akun automaattinen käyttö ajomallilla ei ole niin aktiivista kuin se voisi olla paremmalla mallinnuksella. Ongelma ilmenee esimerkiksi tavoitefunktion puuttumisena, jolloin lataukselle ja purulle ei

ole mallinnettu käytön aloitus- ja lopetuskustannuksia. Ajomallissa on siten pyritty järkevöittämään KL-akun käyttöä vaatimalla vähintään kahden tunnin peräkkäinen lataus- tai purkujakso, joka on myös havaittavissa historiadatasta. Ajomallissa KL-akun varauskapasiteetin rajoja ei käytetä käytön suunnittelun rajoitteina, vaan ne ovat KL-akun käytön edellyttämiä ehtoja. Tämä johtaa siihen, että jos KL-akun varaus on liian pieni tai suuri, ajomalli lopettaa KL-akun käytön.

Ehtolauseiden tiukkojen rajojen vuoksi ajomalli kykenee suunnittelemaan KL-akun käyttöä vain sähköntuotannon kannattavuuden parantamiseksi. Näin ollen KL-akun automatisella käytöllä ei voida vähentää huippu- tai matalakuormien aikana kalliimpien varapolttoaineiden käyttöä tai apujäähdytyksen tarvetta. Optimaalisen käytön kannalta logiikan suorituskykyä heikentää sen käyttämä yhden vuorokauden pituinen aikaikkuna, minkä on todettu olevan taloudellisesta näkökulmasta liian lyhyt optimaalisen käytön saavuttamiseksi [14].

Kuvan 18 perusteella operaattorin ohjatessa KL-akkua, käyttö ei ole aktiivista, vaikka akun käytön kannattavuus sähköntuotannossa perustuu aktiiviseen purkamiseen ja lataamiseen [14]. Haasteena KL-akun manuaalisessa käytössä on, että sen onnistuminen on täysin riippuvainen operaattorin käytön suunnitteluun käytettävissä olevasta ajasta. Lisäksi manuaalinen latauksen ja purkamisen ajoittaminen mukaillee sähkönhinnan profiilia ajomallin suunnittelemaa käyttöä huonommin.



Kuva 18. Operaattorin ohjaama KL-akun käyttö viikolla 4/2018.

Kuvista 17 ja 18 voidaan todeta myös, että KL-akkua ei ole käytetty missään vaiheessa taulukon 3 ilmoittamalla maksimikäyttöteholla. Syyt ilmoitettua KL-akun käyttötehon maksimiarvoa pienempiin toteumiin eivät ole KL-akun käytön nykymenetelmässä, vaan kaukolämpösystemin virtaus- ja painerajoitteissa. Data-analyysia tehtäessä selvisi, että

CHP-laitoksen kaukolämmön menoveden asetusarvo on mitoitettu kaukolämpöverkon kulutuksen mukaan, ilman että KL-akun käyttötehoa huomioidaan. Tämä on johtanut siihen, että KL-akkua ladatessa kaukolämpöverkon virtaus kasvaa, ja kaukolämpöpumpun maksimikapasiteetti tulee vastaan. Sen sijaan KL-akkua purettaessa virtaus on kasvanut menoveden lämpötilan pysyessä samana, jolloin KL-verkon menopaine on kasvanut liian suureksi. Edellä mainituissa tapauksissa operaattorit ovat rajoittaneet KL-akun käyttötehoa, joka on johtanut tuotantosuunnitelmista poikkeamisiin tai KL-akun käytön väheneemiseen.

4.2.2 Mallin soveltaminen

Jotta tehtyä optimointimallia voidaan käyttää Forssan KL-akun operointiin, on luvussa 3 esitellyt parametrit ja muuttujat määritettävä. Käytettävän aikaikkunan pituus valitaan laskemalla eri optimointihorisonteilla liukuvasti käyttökustannus tarkasteltavalla ajanjaksolla. Muut valitut parametrit perustuvat historiadatan analysointiin ja laitteiden teknisten dokumenttien tietoihin.

Tuotannonsuunnittelun ja optimointimallin kannalta haasteellisin osa Forssan kaukolämpötuotannossa on pellettikattila, jonka lämpötehon säätöä tai tuotannon operointia ei pystytä tekemään etäyhteydellä. Näiden seikkojen vuoksi pellettikattilan tuotantoon ei oteta Forssan KL-akun optimointimallissa kantaa, vaan pellettikattilan tuotanto vähennetään kaukolämpökuorman ennusteesta toteutuneen tuotannon mukaisesti. Näin ollen Forssaan sovellettavassa optimointimallissa ainoat tuotantolaitokset ovat CHP-laitos ja öljylämpö-laitos.

CHP-laitoksen ΦP -karakteristika muodostetaan Forssan voimalaitoksen nettorakennusasteen pohjalta [30] sekä historiadataa analysoimalla. Muodostuva epälineaarinen karakteristika jaetaan 7 toimintapisteeseen luvun 3 kuvissa 10 ja 11 esitetyllä tavalla.

Jokaiselle toimintapisteelle määritettiin historiadatasta CHP-laitoksen hyötysuhteiden avulla käyttökustannus (€/MWh). Lopuksi karakteristika jaettiin kuuteen (6) toimintapisteen väliseen janaan, joiden oletettiin käyttäytyvän lineaarisesti nettotehojen ja käyttökustannuksien osalta. Öljylämpölaitoksen oletettiin toimivan aina vakio hyötysuhteella. Etäoperointi mahdollisuuden vuoksi öljylaitokselle ei asetettu käynnistys- tai alasajokustannuksia.

Optimointimallissa tuntikohtaisten kaukolämmöntarpeen, savukaasupesuri lämmöntalteenottotehon ja sähkönhinnan arvoina käytettiin todellisessa tuotannonsuunnittelussa käytettyjä ennusteita. Kaukolämpöveden meno- ja paluulämpötila pohjautuvat tuotannon toteutuneisiin arvoihin. KL-akun varauksen lähtötasoksi valittiin tarkasteltavan ajanjakson alussa KL-akussa ollut varaus.

KL-akun lataus- ja purkutehojen maksimiarvot määritettiin historiadatan avulla muuttamaan kaukolämpökuorman funktiona yhtälön (4-1) mukaisesti, jotta KL-akun käyttö ei nostaisi kaukolämpöverkon virtausta tai menopainetta liian suureksi, ja siten tuotanto pysyisi suunniteltuna.

$$q_s^{t,max} = b_1 Q_{dh}^t + b_2, \quad (4-1)$$

jossa b_1 ja b_2 ovat historiadatan pohjalta määritettyjä viritysparametreja. Tämän funktion avulla KL-akulle määritettiin suurin sallittu käyttöteho jokaiselle tunnille kaukolämpökuormaennusteen avulla. Suurimmillaan KL-akun käyttöteho voi olla 8 MW. Lataus- ja purkutehojen minimiarvoina käytettiin taulukossa 3 ilmoitettua minimikäyttötehoa.

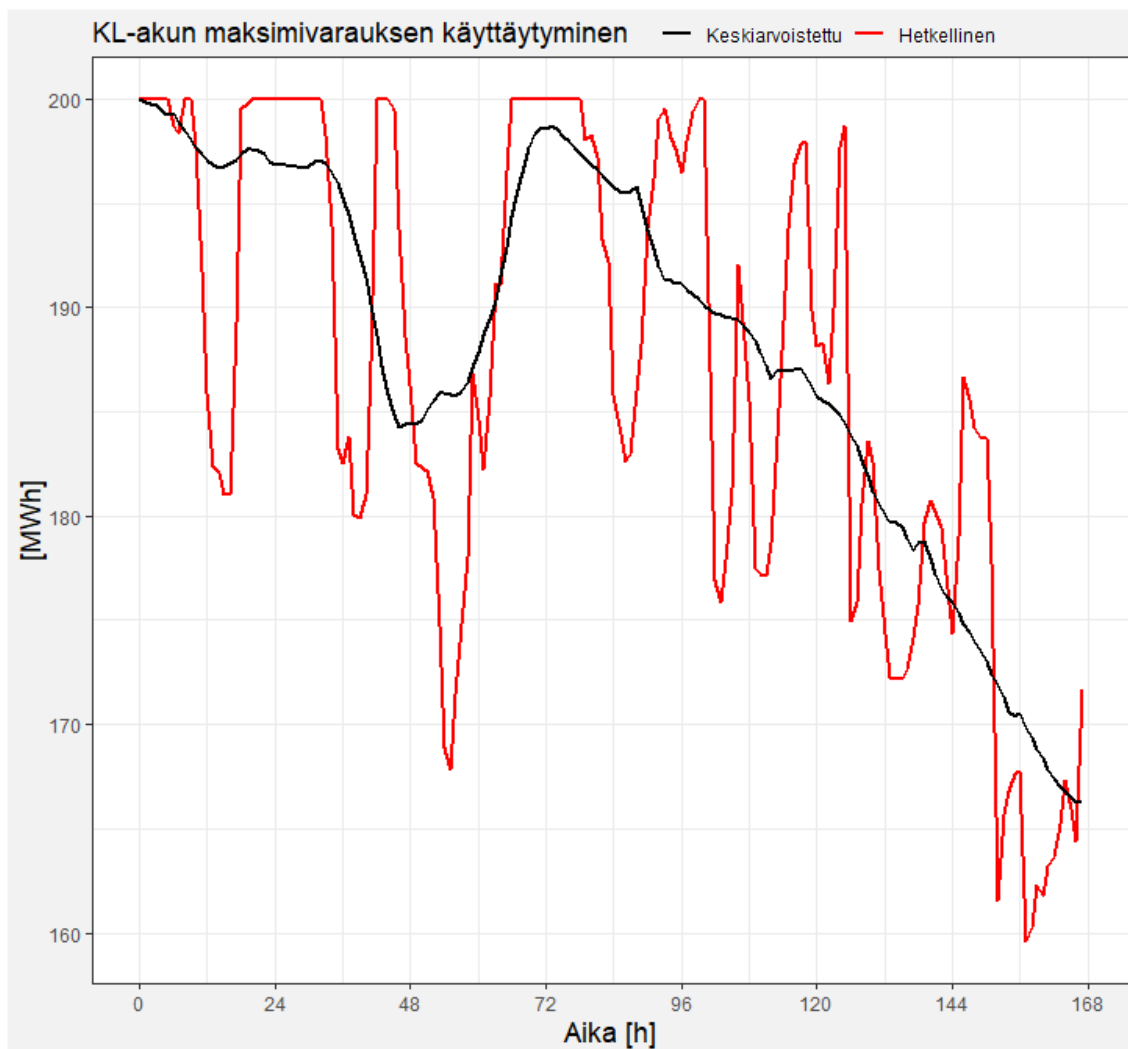
Koska Forssan KL-akku on paineistamaton, eikä sen ja kaukolämpöverkon väliin ole tehty sunttausta, sitä ei voida käyttää kaukolämmön menoveden ollessa kuumimmillaan. Mallissa korkein kaukolämpömenoveden lämpötila, jolla lataus sallitaan, on KL-akun valmistajan ilmoittama mitoitus käyttölämpötila. Tarkasteluajanjakson tuotantodatoista ei löydetty yhtään tuntia, jolloin kaukolämmön menoveden lämpötila olisi ollut yli mitoitettua käyttölämpötilan.

KL-akun maksimivarauskapasiteetille laskettiin arvo jokaiselle tunnille. Laskenta perustui kaavaan (2-1), mutta suoraan käytettynä kaavalla päädyttiin tilanteeseen, jossa maksimikapasiteetin arvo vaihteli niin paljon, että optimointimallin päätyi epäratkaistavissa olevaan tilanteeseen. Suuren vaihtelun välttämiseksi maksimikapasiteetin laskemisessa päätettiin käyttää 24 tunnin keskiarvoa paluu- ja menoveden lämpötiloissa, jolloin kaava (2-1) muuttui kaavaksi (4-2).

$$Q_a^{t,max} = \frac{\pi d^2}{4} l_a p_w c_w (T_{ss,av} - T_{rs,av}), \quad (4-2)$$

jossa $T_{ss,av}$ on kaukolämmön menoveden lämpötilan 24 tunnin keskiarvo ja $T_{rs,av}$ on kaukolämmön paluuv veden lämpötilan 24 tunnin keskiarvo.

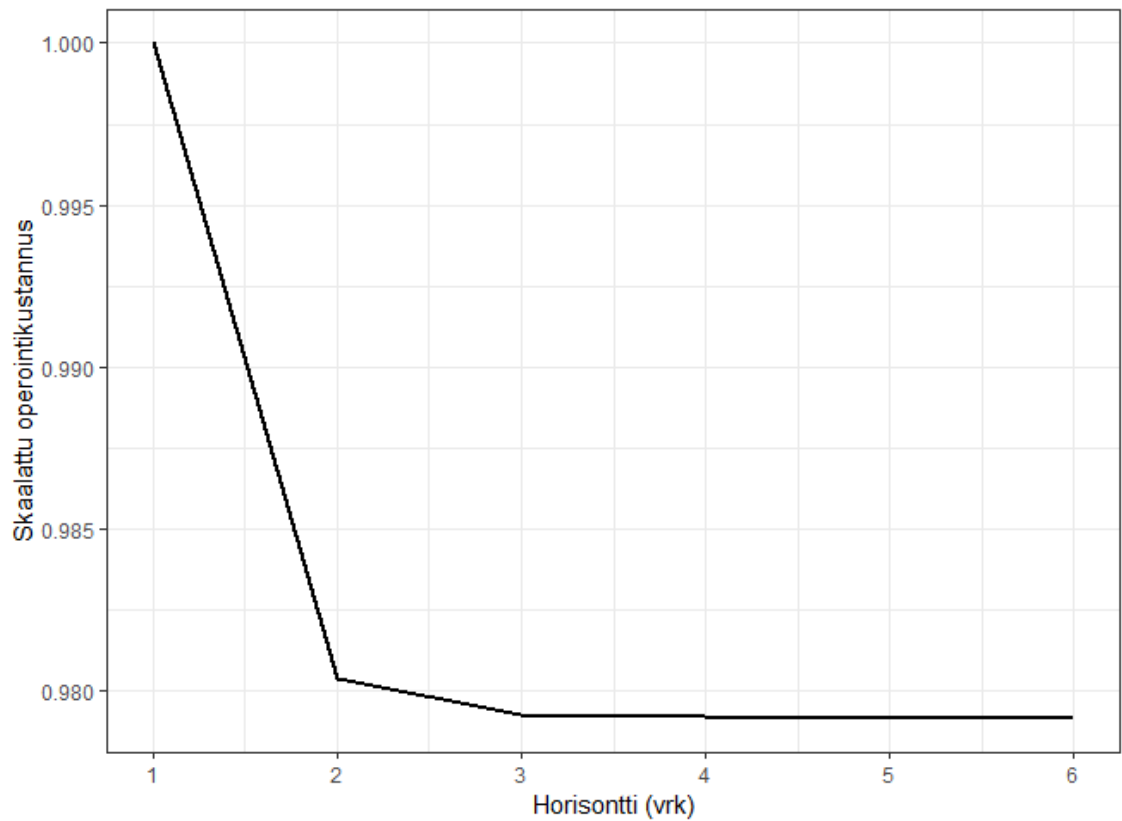
Kyseisellä menetelmällä määritetty KL-akun maksimivarauskapasiteetin käyttäytyminen tutkittiin tarkasteltavalla ajanjaksolla. KL-akun maksimivaraus laskettiin ajanjakson joka tunnille kaavalla (4-2). KL-akun maksimivarauskapasiteetin vaihtelu pieneni huomattavasti ja optimointiongelman todettiin pysyvän ratkaistavissa. Kuvassa 19 on esitetty kaavalla (2-1) ja kaavalla (4-2) lasketun maksimikapasiteetin ero viikon pituisella ajanjaksolla.



Kuva 19. Hetkellisen ja keskiarvoistetun KL-akun maksimivarauksen käyttäytymisen ero.

KL-akun pumppaamisen aloittaminen ja päättymisen ovat laitteistoa rasittavien teho-
muutoksien välttämiseksi rampitettu. Rampituksen pituudeksi on valittu 10 minuuttia,
jonka aikana automaatiojärjestelmä ohjaa lataus- tai purkutehon muutettuun asetusar-
voon. Pumppauksien rampitukset kuvataan mallissa viiveellisinä askelvasteina, joiden
viive on 10 minuuttia.

Tuloksien määrittämistä varten Forssan KL-akun käytön optimoinnille määritettiin vielä
sopivin liukuvan aikaikkunan pituus, eli optimointihorisontin pituus. Sopivin aikaikkuna
pituus etsittiin ajamalla Forssaan sovellettu optimointimalli läpi 1, 2, 3, 4, 5 ja 6 vuoro-
kauden horisonteilla vuoden vertailuajanjakson yli, ja vertaamalla eri horisonteilla saatuja
käyttökustannuksia toisiinsa. Vertailu suoritettiin toteutuneella kaukolämmöntarveda-
talla, koska yli kolmen vuorokauden pituisille horisonteille ei ollut vertailukelpoisia tuo-
tantoennusteita saatavilla. Kuvasta 20 huomataan, että siirryttäessä yhden vuorokauden
pituisesta horisontista kahden vuorokauden horisonttiin käyttökustannukset putoavat 2 %.
Kolmen vuorokauden horisonttia käytettäessä kustannukset vähenevät vielä lähes 0.5 %,
mutta tämän jälkeen käyttökustannukset eivät enää merkittävästi parane.



Kuva 20. Käytettävän optimointihorisontin pituuden vaikutus käyttökustannuksiin.

Forssan tapauksessa käytettävän optimointihorisontin pituudeksi valittiin kuvan 20 perusteella kolme vuorokautta (72 h), koska käyttökustannusero pitempiin horisontteihin on suhteellisen pieni, vertailukelpoinen tuotannonsuunnitteludata on saatavilla ja kolmen vuorokauden horisonttia on mahdollista käyttää Forssan tuotannon lyhyen aikavälin suunnittelussa. Tavoitefunktion (2-5) käyttökustannuksien määrittämisessä käytetyt polttoainehinnat pohjautuvat Pöyryn polttoainehintatilastoon [31] ja CHP-laitoksessa käytettyyn polttoaineseokseen. Loput systeemin raja-arvoista ja parametreista määritettiin laitevalmistajien teknisistä dokumentaatioista tai historiadatan analysoinnilla. Forssan KL-akun optimoinnissa käytetyt kiinteät parametrit ovat koottu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Forssan KL-akun optimoinnissa käytetyt kiinteät parametrit.

| Käytetyt parametrit | |
|--|----------|
| CHP-laitoksen maksimikaukolämpöteho, Q_{CHP}^{max} | 45 MW |
| CHP-laitoksen minimikaukolämpöteho, Q_{CHP}^{min} | 8 MW |
| CHP-laitoksen polttoainekustannus, c_{CHP} | 24 €/MWh |
| Apukattilan maksimikaukolämpöteho, Q_{HOB}^{max} | 36 MW |
| Apukattilan minimilämpöteho, Q_{HOB}^{min} | 2 MW |
| Apukattilan minimikäyttöaika, Δt_{HOB}^{min} | 2 h |
| Apukattilan käyttökustannus, c_{HOB} | 70 €/MWh |
| Apujäähdytyksen maksimiteho, Q_{aux}^{max} | 6 MW |
| Apujäähdytyksen käyttökustannus, c_{aux} | 50 €/MWh |
| KL-akun maksimikäyttöteho, q_s^{max} | 8 MW |
| KL-akun minimikäyttöteho, q_s^{min} | 2.5 MW |
| KL-akun maksimikäyttölämpötila, T_s^{max} | 105 C |
| KL-akun varaus hetkellä 0, S_q^0 | 126 MWh |
| KL-akun maksimivaraus, S_q^{max} | 200 MWh |
| KL-akun minimivaraus, S_q^{min} | 20 MWh |
| KL-akun käytön aloitus- tai lopetuskustannus, $c_{\frac{start}{stop}}$ | 6.5 € |
| Optimoinnissa käytettävän aikaikkunan pituus, T | 72 h |

5. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään optimointimallin suunnittelemaa KL-akun käytöllä lasketut tulokset. Luvun ensimmäisessä osiossa verrataan optimointimallilla suunniteltua KL-akun käyttöä nykykäytännön toteuttamaan operointiin. Seuraavaksi tarkastellaan mallissa huomioitujen käytännön rajoitteiden vaikutuksia KL-akun käyttöön, ja KL-akulla saavutettaviin kustannussäästöihin CHP-tuotannossa.

5.1 Optimointimallin vertaaminen nykykäytäntöön

Optimointimallin toimintaa verrattaessa nykykäytäntöön, simuloidaan KL-akun käyttöä optimointimallilla CHP-systeemin ja kaukolämpöverkon oikealla historiadatalla vuoden ajalta. Simuloinnista saatua optimointimallin suunnittelemaa KL-akun käyttöä vertaillaan toteutuneeseen KL-akun käyttöön optimointimallin soveltuvuuden arvioimiseksi. Simulointi suoritetaan tuotannonsuunnittelussa käytetyillä lämmöntuotantoennusteilla, jotta optimoinnin ja käytännön tulokset ovat vertailukelpoisia.

Käyttökustannukset lasketaan Forssan CHP-tuotannon ja kaukolämpöverkon historiadatalla yhden kalenterivuoden pituiselta jaksolta 5/2017 – 4/2018. Käytettävien lämmöntuotantoennusteiden sisältämät ennustevirheet johtavat tilanteisiin, joissa KL-akun käyttö ylittää tuotannon rajoitteita. Tästä aiheutuvat tasevirheet korjataan toteuttamaan CHP-systeemin taseet ja rajoitteet apujäähdytyksen tai -kattilan käyttöä lisäämällä. Tämän jälkeen lasketaan vertailukelpoinen optimoitu käyttökustannus koko tarkasteltavalle ajanjaksolle.

Tuloksien vertailussa on huomioitava, että toteutuneessa operoinnissa virheellisesti suunnitellun KL-akun käytön korjaus eroaa simuloinnissa tehtävästä korjauksesta. Todellisuudessa operaattori tekee päätöksen joko muuttaa KL-akun operointisuunnitelmaa tai käyttää apujäähdytystä tai -kattiloita pitääkseen CHP-tuotannon toiminta-alueensa sisällä. Sen sijaan optimointimallin tuloslaskennassa, tuotannon raja-arvojen ylitystilanteissa tilanne ratkaistiin aina apujäähdytystä tai -kattilaa käyttämällä, joka on yleensä kalliimpi ratkaisu.

Käyttökustannuksien vertaamisen lisäksi optimointimallin toimivuutta tarkastellaan tutkimalla käyttökustannuksien eroamiseen johtaneita syitä. Tarkasteltavat eroavaisuudet ovat KL-akun käytön vaikutukset tuotetusta sähköstä saatuun hintaan sekä tarvittavaan apukattilan tai -jäähdytyksen tarpeeseen, käyttötilanteesta riippuen.

Verrattaessa optimointimallin suunnittelemaa KL-akun käyttöä toteutuneeseen käyttöön, olisi Forssan kaukolämmöntuotannon vuotuinen käyttökustannus ollut 2,3% pienempi, jos KL-akkua olisi käytetty optimointimallin suunnitelman mukaisesti. Vaikka vaikutus

kokonaiskäyttökustannuksiin on prosentuaalisesti pieni, nosti optimointimalli KL-akusta saatavia taloudellisia hyötyjä 303 %.

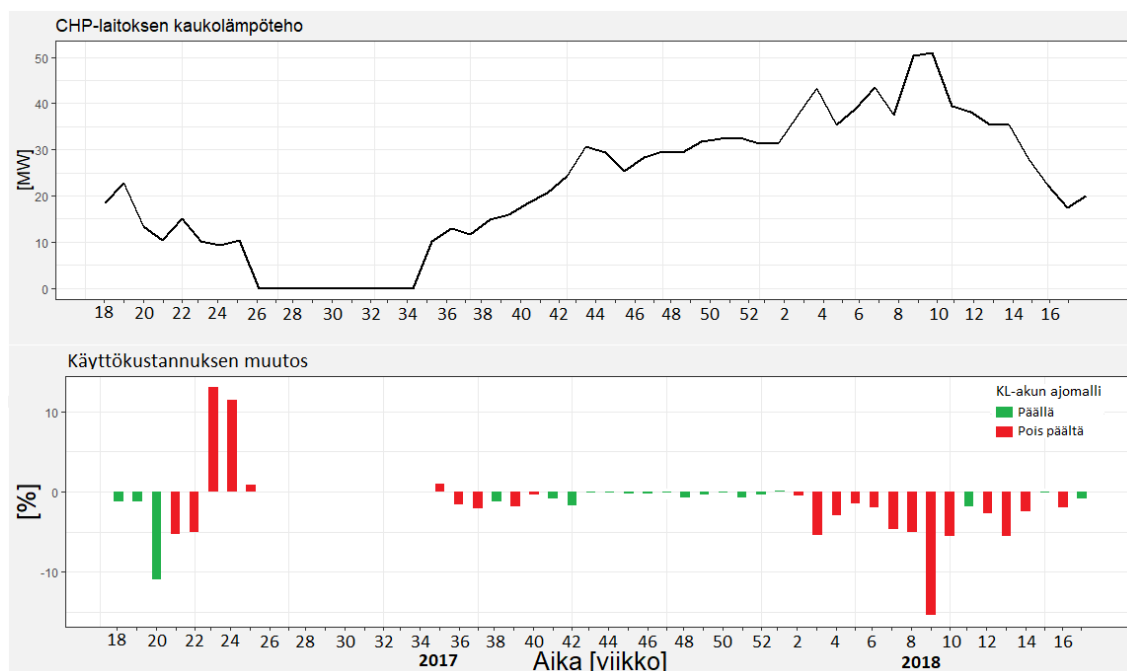
Optimointimalli vähentää käyttökustannusta kasvattamalla CHP-tuotannon määrää, ajoittamalla sähköntuotantoa, vähentämällä apukattiloiden sekä apujäähdytyksen käyttöä ja huomioimalla voimalaitoksen hyötysuhteen käyttäytymisen. Jokaisen osatekijän vaikutus käyttökustannukseen ja tuotettuun energiaan on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. *Tekijät, joihin vaikuttamalla optimointimalli pienensi käyttökustannusta nykykäytäntöön verrattuna.*

| | % | MWh |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Käyttökustannuksen kokonaismuutos | 2.3 | - |
| sähköntuotannon lisääntyminen | 0.42 | 374.5 |
| Sähköntuotannon ajoituksen vaikutus | 1.17 | - |
| Apukattiloiden käytön vähentäminen | 0.52 | -1070 |
| Apujäähdytyksen vähentäminen | 0.27 | -236 |
| Voimalaitoksen hyötysuhteen vaikutus | -0.08 | - |

Kaikista tekijöistä sähköntuotannon ajoituksella oli selvästi suurin vaikutus käyttökustannusten pienenemiseen, joten optimointimalli siirsi sähköntuotantoa KL-akun käytöllä kannattavammille tunneille nykykäytäntöä paremmin. Seuraavaksi suurimmat vaikutukset olivat apukattiloiden käytön vähentämisellä, joka johti samalla kasvaneen CHP-tuotannon myötä kasvaneeseen sähköntuotantoon.

Käyttökustannuksen muutoksen havaittiin vaihtelevan suuresti eri viikkojen aikana, eikä koostuvan tasaisesta parannuksesta. Kuvassa 21 on esitetty viikkokohtainen käyttökustannuksen muutos sekä CHP-laitoksen tuottaman kaukolämpötehon keskiarvo. Kuvaan on värikoodattu käyttökustannuksen muutos -palkki vihreällä, jos nykyinen KL-akun automaattinen ajomalli on ollut päällä vähintään 70% kyseisen viikon tunneista.



Kuva 21. Optimointimallin vaikutus CHP-tuotannon käyttökustannuksiin viikkokohtaisesti.

Kuvasta 21 nähdään, että CHP-laitoksen kaukolämpötehon suuruusluokalla on selvä vaikutus käyttökustannuksen muutokseen. Työssä tehdyn optimointimallin suurimmat vaikutukset käyttökustannuksiin ajoittuvat viikoille, joilla kaukolämpöteho on lähellä CHP-laitoksen minimi- tai maksimitehoa, ja KL-akua on siten käytetty manuaalisesti operaattorin toimesta. Kun kaukolämpökuorman keskiarvo on tehoalueen keskivaiheilla, käyttökustannus pienenee vain hieman verrattuna nykyisen ajomallin suunnittelemaan KL-akun käyttöön. Taulukossa 6 on verrattu optimointimallin aiheuttamaa käyttökustannuksen muutosta ajomallin ja manuaalisen operoinnin viikoilla aikajakson yli. Viikot 26-34 olivat CHP-laitoksen vuosihuoltoviikkoja, jolloin KL-akun käyttö ei ole kannattavaa, eikä sillä ole siten mahdollista vaikuttaa vuosihuoltoviikkojen käyttökustannuksiin.

Taulukko 6. Käyttökustannuksen muutoksen jakautuminen ajomallin ja manuaalisen operoinnin välillä.

| | % |
|--|-------|
| Käyttökustannuksen kokonaismuutos | -2.3 |
| Käyttökustannuksen muutos ajomallin viikoilla | -0.46 |
| Käyttökustannuksen muutos manuaalisen operoinnin viikoilla | -1.84 |

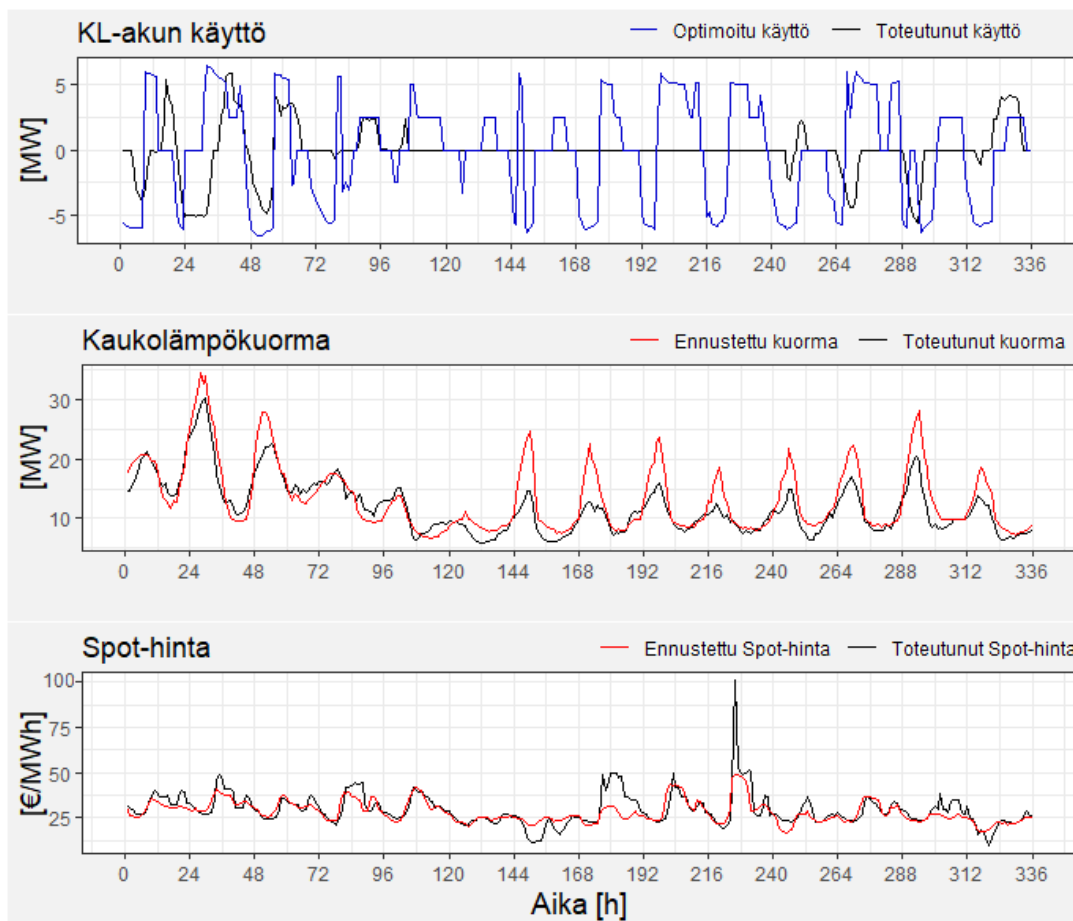
Kuvan 21 perusteella valitaan kahden viikon jaksoja, joissa KL-akun käytön eroavaisuuksia nykyisellä ja optimointimallin menetelmällä tarkastellaan seuraavissa alaluvuissa. Viikot 21 ja 22 valitaan tarkasteltaviksi, koska niiden aikana optimointimalli on pienentänyt käyttökustannusta 5-10 %. Viikkojen 23 ja 24 aikana kaukolämpökuorma on ollut suunnilleen samalla tasolla kuin viikoilla 21 ja 22, mutta niitä tarkastellaan viikkojen 21

ja 22 lisäksi, koska käyttökustannukset ovat kasvaneet yli 10 % optimointimallin suunnittelemalla KL-akun käytöllä molemmilla viikoilla. Keskisuurilla kuormilla tarkastellaan lähemmin optimointimallin ja nyky menetelmän eroja viikoilla 48 sekä 49 ja suurilla kuormilla vuoden 2018 viikoilla 9 ja 10. Valitut viikot edustavat kattavasti eri kaukolämpökuormatason tilanteita sekä sisältävät ajomallin ja operaattorin suunnittelemaa KL-akun käyttöä.

5.1.1 KL-akun käyttö matalalla kaukolämpökuormalla

Viikoilla 20-37 kaukolämpökuorma on muutamaa poikkeavaa tuntia lukuun ottamatta hyvin pientä. Optimointimallin käyttäytymistä tarkastellaan tässä luvussa viikoilla 21 ja 22 sekä 23 ja 24. Viikot 21 ja 22 kuvastavat hyvin KL-akun käyttöä matalilla kuormilla molemmilla menetelmillä, mutta viikot 23 ja 24 lisättiin tarkasteluun, jotta syyt kuvasta 21 todettuun yli 10 % kasvaneeseen käyttökustannukseen saadaan selville.

Viikolla 21 KL-akun käyttöä ohjasi ajomalli ja viikolla 22 operaattori. Toteutunutta ja optimointimallin suunnittelemaa KL-akun käyttöä näillä viikoilla vertaillaan kuvassa 22. Kuvassa negatiivinen KL-akun käyttö kuvastaa purkamista, eli käyttö pienentää CHP-laitoksen kaukolämpökuormaa, ja positiivinen akun lataamista. Kuvan kaukolämpökuorma on kaukolämpöverkon kuorma, johon ei ole laskettu KL-akun käyttötehoa.



Kuva 22. Optimoidun ja toteutuneen KL-akun käytön vertailu viikoilla 21 ja 22. Ajanjaksoalla kaukolämpökuorma on pieni.

Kuvasta 22 voidaan todeta, että tuntien 0 ja 96 välisenä aikana sekä toteutunut käyttö että optimoitu käyttö ovat aktiivista, ja mukailevat sähkönhinnan profiilia. Optimoitu käyttö reagoi toteutunutta käyttöä enemmän pieniin muutoksiin sähkönhinnan profiilissa. Tämä johtuu nykyisen ajomallin tiukoista ehdoista, jotka eivät taivu yhtä joustavaan käyttöön kuin optimointimallin matemaattiset rajoitukset. 108 tunnin kohdalla kaukolämpökuorman ennuste on laskenut niin matalaksi, että ajomallin ehdot eivät anna sen enää käyttää KL-akkua. Optimointimalli sen sijaan jatkaa KL-akun käyttöä aktiivisesti, mutta ajoittaa nyt KL-akun käyttöä myös kuormaennusteen mukaan vähentääkseen epäkantattavaa apujäähdytystä. Tämä näkyy esimerkiksi akun lataamisena 108 – 120 tuntien hyvin matalan kuorman aikana sekä purkamisena tuntien 126 ja 144 ennustettujen kuormapiikkien aikana.

Viikolla 22 (kuvassa 22 tunnit 169 – 336) optimoitu käyttö mukailee sekä sähkönhinnan profiilia että ennustettua matalaa lämpökuormaa. Toteutuneessa käytössä KL-akkua on käytetty viikon aikana vain 6 kertaa. Näinä kertoina operaattori on käyttänyt KL-akkua tasataksen CHP-laitoksen lämmöntuotantoa, ja siten onnistunut vähentämään apujäähdytyksen tarvetta tuntien 250 ja 324 ympärillä. Manuaalisen käytön kääntöpuoli ilmenee

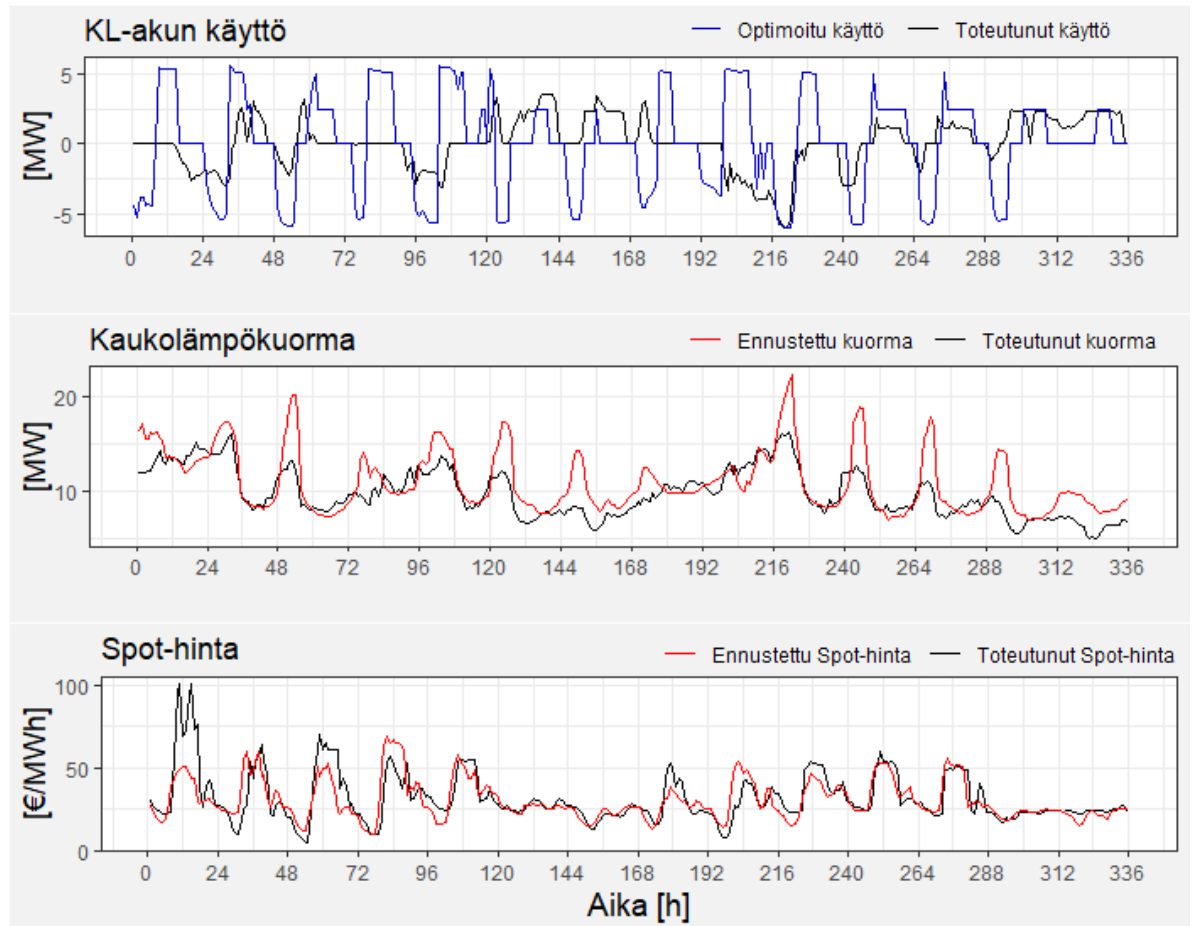
hyvin kuvasta 22. Manuaalisella käytöllä ei ole pystytty huomioimaan sähkönhinnan profiilia spot-markkinoilla, joten KL-akkua ei hyödynnetty tuotannossa tunnin 230 ympärillä olleen korkean sähkön spot-hinnan aikana, toisin kuin optimointimallin suunnitelmassa käytössä. Taulukossa 7 esitetään numeeriset vertailutulokset KL-akun käytöstä viikoilta 21 ja 22.

Taulukko 7. Tulokset KL-akun käytöstä pienen kaukolämpökuorman aikana.

| | VIIKKO 21/2017 | | VIIKKO 22/2017 | |
|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Optimoitu käyttö | Toteutunut Käyttö | Optimoitu käyttö | Toteutunut käytöt |
| Manuaalinen operointi (Kyllä / Ei) | Ei | Ei | Ei | Kyllä |
| KL-akun käyttötunnit (h) | 108 | 57 | 128 | 31 |
| Tuotetun sähkön spot-hinnan keskiarvo (€/MWh) | 31.2 | 30.06 | 31.01 | 28.91 |
| KL-akun käyttötehon keskiarvo (MW) | 2.8 | 1.3 | 3.5 | 0.6 |
| Tarvittava apujäähdytys (MWh) | 71 | 203 | 188 | 237 |

Viikolla 21 optimointimallin suunnittelema KL-akun käyttö pienensi käyttökustannuksia noin 11,4 % ja viikolla 22 noin 5,3 %. Viikon 21 suuri muutos käyttökustannuksissa johtuu optimointimallin ja toteutuneen käytön apujäähdytyksen tarpeen suuresta erosta. Nykyisen ajomallin ja operaattorin manuaalisesti suunnittelemaa käyttöä verratessa huomataan, että erot käyttötunneissa, tuotetusta sähköstä saadussa hinnassa ja KL-akun käyttötehon keskiarvossa kasvavat optimoitua ja toteutunutta käyttöä vertailtaessa.

Tutkittavista viikoista kuvan 21 viikot 23, 24, 25 ja 35 erottuivat selvästi muista, sillä näillä viikoilla optimointimallin käyttö nosti CHP-tuotannon käyttökustannusta verrattuna nykykäytäntöön. Kaikkia optimointimallin käyttökustannuksia nostavia viikkoja yhdistää alhainen kaukolämpökuorma sekä KL-akun toteutuneen käytön manuaalinen ohjaus. Kuvassa 23 vertaillaan KL-akun toteutunutta käyttöä ja optimointimallin suunnittelemaa käyttöä viikoilla 23 ja 24, joilla optimointimalli nosti käyttökustannuksia eniten.



Kuva 23. Optimoidun ja toteutuneen KL-akun käytön vertailu matalien kaukolämpökuormien viikoilla 23 ja 24.

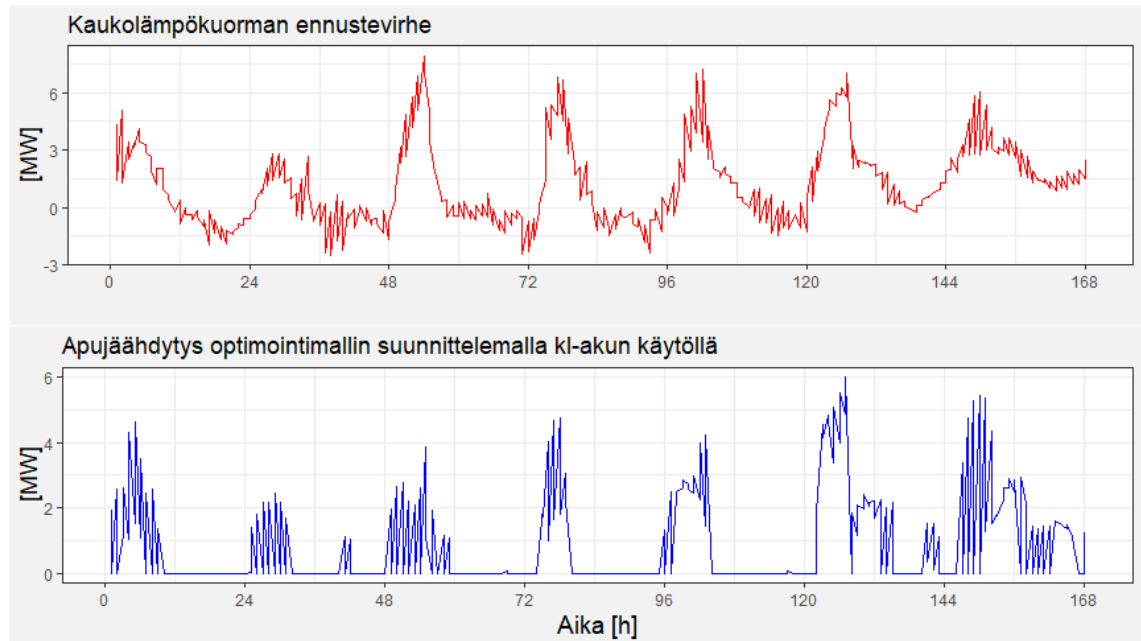
Kuvasta 23 voidaan todeta KL-akun optimoidun käytön olevan myös tappiollisilla viikoilla toteutunutta käyttöä aktiivisempaa. Toteutuneessa kaukolämpökuormassa vuorokausirytmien mukainen kuormatasojen vaihtelu on tasaantunut verrattuna viikkoihin 21 ja 22. Tämä on johtanut viikoilla 23 ja 24 suuriin ennustevirheisiin kaukolämpökuormassa, jolloin optimointimalli on purkanut KL-akkua liian suurella teholla kuormaan nähden. Taulukkoon 8 kootut numeeriset tulokset vahvistavat, että tarvittavan apujäähdytyksen määrä on viikoilla 23 ja 24 huomattavasti suurempi optimointimallin operoimassa KL-akun käytössä.

Taulukko 8. Tulokset KL-akun käytöstä kasvaneiden käyttökustannuksien viikoilla.

| | VIIKKO 23/2017 | | VIIKKO 24/2017 | |
|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Optimoitu käyttö | Toteutunut Käyttö | Optimoitu käyttö | Toteutunut käytöt |
| Manuaalinen operointi (Kyllä / Ei) | Ei | Ei | Ei | Ei |
| KL-akun käyttötunnit (h) | 99 | 80 | 100 | 97 |
| Tuotetun sähkön spot-hinnan keskiarvo (€/MWh) | 40.07 | 33.87 | 33.31 | 30.08 |
| KL-akun käyttötehon keskiarvo (MW) | 2.7 | 1.1 | 2.4 | 1.4 |
| Tarvittava apujäähdytys (MWh) | 159 | 0 | 126 | 2.8 |

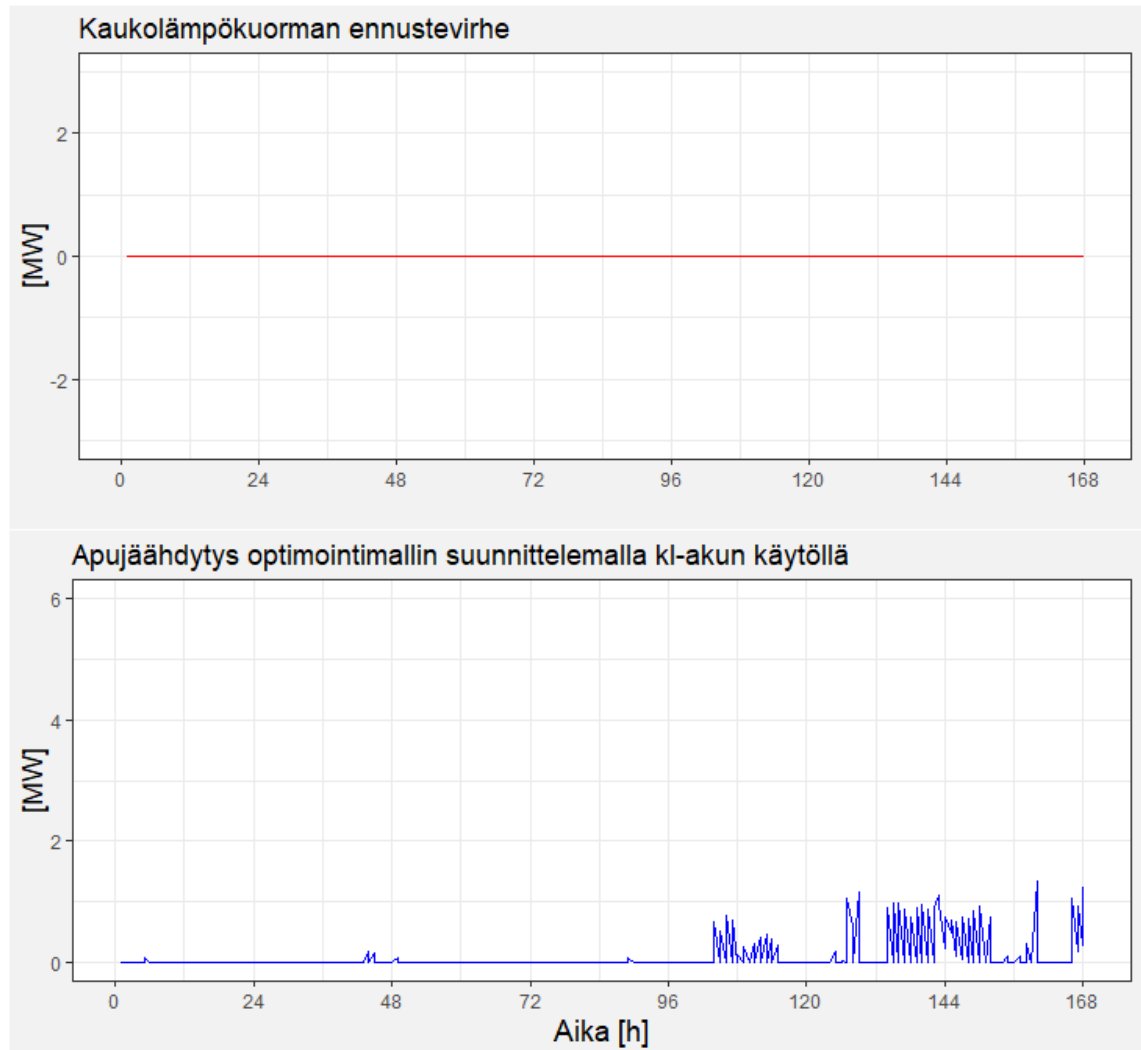
Taulukon 8 tuloksien mukaan KL-akun optimoitu käyttö on suunnilleen samalla tasolla tuntimääräisesti kuin viikoilla 21 ja 22, mutta silti käyttökustannukset nousivat nykykäytäntöön verrattuna viikolla 23 noin 13 % ja viikolla 24 noin 11 %. Optimointimallin ja toteutuneen operoinnin käyttötuntien välinen ero on paljon pienempi kuin aiemmin tarkastelluilla viikoilla 21 ja 22. Se ei kuitenkaan selitä, miksi optimoitu käyttö olisi toteutunutta epäkannattavampaa, varsinkin, kun tuotetusta sähköstä saatu keskihinta on ollut optimointimallilla suurempi. Optimoidun käytön epäonnistumisen syy löytyy taulukon 8 viimeiseltä riviltä, eli apujäähdytyksen suuresta tarpeesta optimointimallin suunnittelemalla käytöllä.

Apujäähdytyksen suureen tarpeen voidaan todeta johtuvan kaukolämpökuorman ennustevirheistä, joissa ennustettu kaukolämpökuorma on toteutunutta suurempaa. Näiden ennusteissa esiintyvien virheellisten kuormapiikkien aikaan optimointimalli pyrkii purkamaan KL-akun verkkoa, kun taas manuaalinen operointi on pohjautunut toteutuneeseen kaukolämpökuormaan reaaliajassa. Kuvasta 24 nähdään, että optimoidun käytön tarvitsema apujäähdytys ajoittuu ennustevirheen omaaville tunneille viikoilla 23 ja 24.



Kuva 24. Ennustevirheen vaikutus apujäähdytyksen tarpeeseen optimointimallia käytettäessä.

Jos optimointimallia käytettäisiin oikeassa tuotannossa, ennustevirheen vaikutus käyttökustannuksiin ei olisi näin suuri, koska operaattori pystyy manuaalisesti ottamaan KL-akun purun pois päältä ennustevirhetapauksissa. Ennustevirheen parantaminen matalilla kuormilla, varsinkin absoluuttisten minimikuormien osalta, tekisi automaattisesta KL-akun käytöstä kannattavampaa. Kuvassa 25 on esitetty apujäähdytyksen tarve optimointimallin suunnittelemalla KL-akun käytöllä tilanteessa, jossa lämmöntuotantoennuste olisi virheetön.



Kuva 25. Apujäähdytyksen tarve optimointimallin suunnittelemalla KL-akun käytöllä ilman lämmöntuotannon ennustevirhettä.

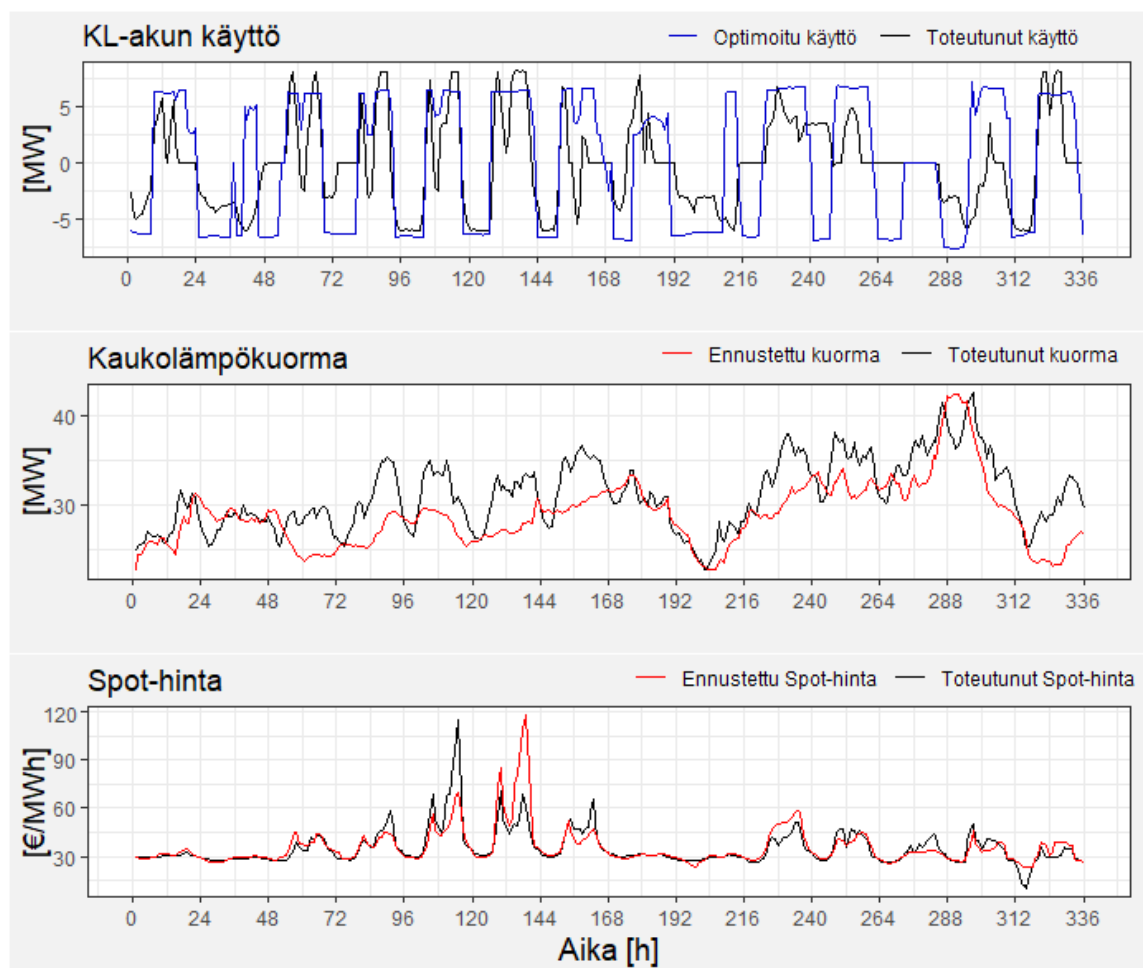
Kuvien 24 ja 25 apujäähdytystä verrattaessa nähdään, että lämmöntuotannon ennustevirheen minimoinnilla on valtava vaikutus tarvittavaan apujäähdytykseen. Viikoilla 23 ja 24 ennustevirheen vuoksi tehdään ylimääräistä apujäähdytystä 254.1 MWh. Ilman ennustevirhettä optimointimalli olisi pienentänyt käyttökustannusta viikolla 23/2017 0.2 % ja 0.7 % viikolla 24/2017.

Yhteenvedona voidaan todeta, että matalilla kaukolämpökuormilla KL-akun käytön merkittävin taloudellinen hyöty verrattuna käytettävään ajomalliin on apujäähdytystarpeen vähentäminen. Nykyinen ajomalli ei pysty vähentämään suunnitelmallisesti apujäähdytyksen käyttöä, joten optimointimalli tuo huomattavan parannuksen käyttökustannuksiin pienillä kuormilla. Apujäähdytystarpeen vähentämisen onnistuminen optimointimallilla vaatii tarkemman ennusteen seuraavan vuorokauden kaukolämpökuormasta. Manuaalisessa operoinnissa apujäähdytyksen tarvetta voidaan välttää KL-akun käytöllä melkein yhtä tehokkaasti kuin optimointimallilla. Inhimilliset rajoitteet tuovat kuitenkin omat

haasteensa, jotka näkyvät vähäisempänä KL-akun käyttönä ja tuotetun sähkönhintaoptimoinnin puuttumisena.

5.1.2 KL-akun käyttö keskisuurella kaukolämpökuormalla

Tarkastelujakson viikoilla 48 ja 49 kaukolämpökuorma on aina 40 - 100% välillä CHP-laitoksen maksimikaukolämpötehosta. Kuorman pysyessä CHP-laitoksen tehoalueella, myös nykyisellä ajomallilla on mahdollista suunnitella KL-akun käyttöä täysimääräisesti. Molemmilla tarkasteltavilla viikoilla KL-akun käyttö on ajomallin ohjaamaa. Kuvassa 26 on vertailtu työssä tehdyn optimointimallin suunnittelemaa ja ajomallin toteuttamaa KL-akun käyttöä viikkojen 48 ja 49 tilanteissa.



Kuva 26. Optimoidun ja toteutuneen KL-akun käytön vertailu keskisuurenkuorman omaavilla viikoilla 48 ja 49.

Kuvan 26 perusteella optimointimallin ja ajomallin suunnittelemissa käytöissä on hyvin vähän eroa, kun toimitaan CHP-laitoksen kaukolämmöntuotannon toiminta-alueella. Molemmat käyttävät KL-akkua sähkönhinnan profiilin mukaisesti hyötyäkseen vuorokauden sisäisistä sähkönhinnan vaihteluista. Tarkasteltavilla viikoilla ajomallin sallima maksimi-

latausteho näyttää olleen suurempi kuin optimointimalliin asetettu maksimilatausteho kyseisellä kaukolämpökuormalla. Toteutunut käyttö on kuvasta 26 katsottuna piikikkäämpää, eli suuritehoiset lataus- ja purkukäytöt ovat ajallisesti lyhyempiä kuin optimointimallin vastaavat. Lisäksi ajomallin sisältämä vaatimus kahdesta peräkkäisestä lataus- tai purkutunnista aiheuttaa KL-akulle käyttämättömiä hetkiä. Tämä on havaittavissa esimerkiksi kuvan 26 tunneilla 260-288, kun sähkönhinnan ennuste vaihtelee vuorokauskeskiarvon molemmin puolin. Samaa ilmiötä on havaittavissa usean vuorokauden vaihtumisen ympärillä, joten ajomallin KL-akun käyttötunnit ovat systemaattisesti optimointimalia vähäisemmät. Tämä käy ilmi myös taulukkoon 9 tehdystä numeeristen tuloksien vertailusta.

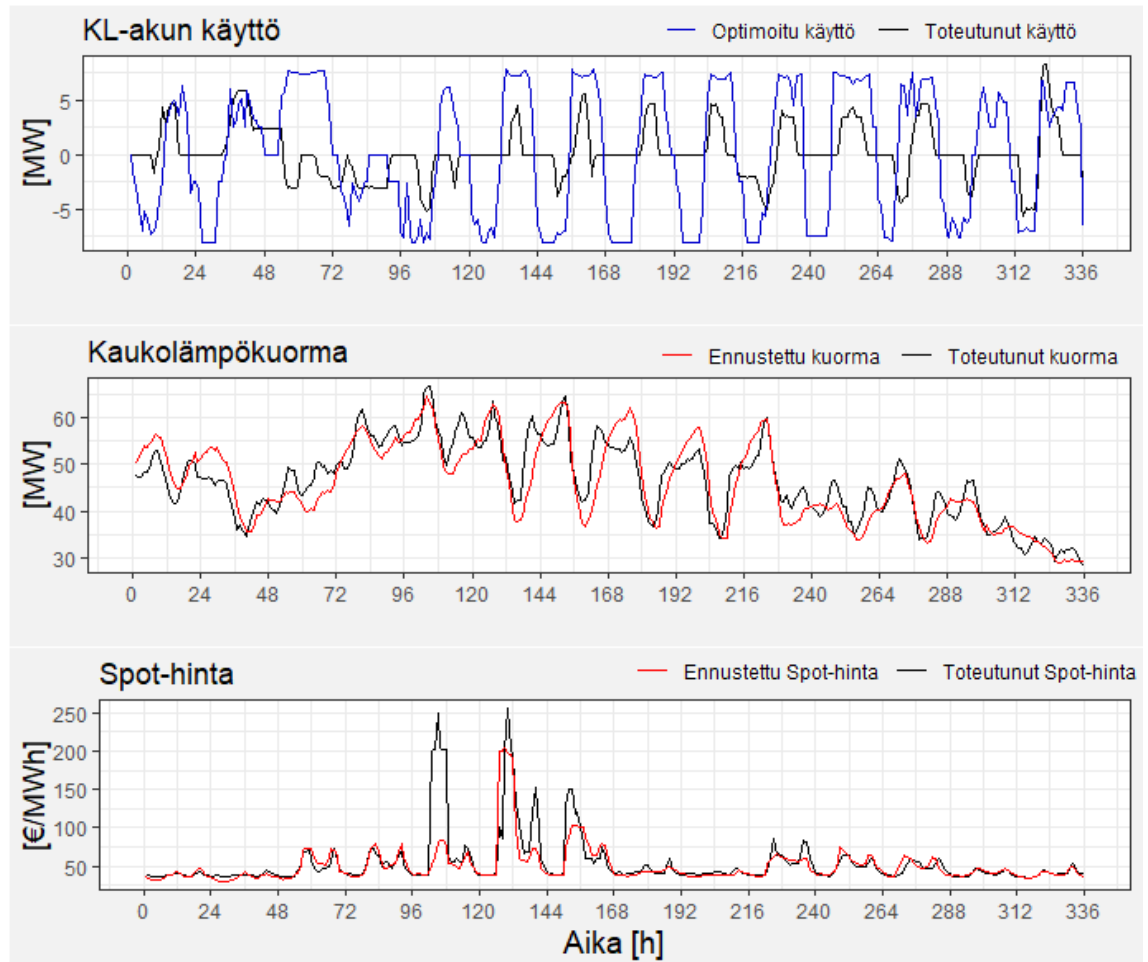
Taulukko 9. *Vertailutulokset KL-akun käytöstä keskiarvon kaukolämpökuorman aikana.*

| | VIIKKO 48/2017 | | VIIKKO 49/2017 | |
|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Optimoitu käyttö | Toteutunut Käyttö | Optimoitu käyttö | Toteutunut käytöt |
| Manuaalinen operointi (Kyllä / Ei) | Ei | Ei | Ei | Ei |
| KL-akun käyttötunnit (h) | 163 | 133 | 152 | 103 |
| Tuotetun sähkön spot-hinnan keskiarvo (€/MWh) | 41.13 | 40.82 | 34.59 | 33.66 |
| KL-akun käyttötehon keskiarvo (MW) | 5.8 | 3.8 | 5.4 | 2.6 |

Viikolla 48 optimointimallin laskettiin pienentävän tuotannon käyttökustannuksia 0.7 % ja viikolla 49 0.4 %. Vertailtaessa vaikutuksia käyttökustannukseen keskiarvoilla kuormilla, on optimointimalli nyky menetelmää parempi. Suuremmista käyttötunneista johtuen optimointimallin käyttötehon keskiarvo on keskimäärin kaksinkertainen ajomallin toteuttamaan käyttötehoon verrattuna, vaikka ajomallin suurimman sallitun lataustehon huomattiin olevan suurempi kuin optimointimallin. Sen sijaan sähköntuotannon ajoituksessa optimointimallin ja nykyisen ajomallin välinen ero on pieni, varsinkin viikon 48 perusteella. Silti optimointimallin voidaan todeta toimivan hieman nykyistä menetelmää paremmin myös sähköntuotannon ajoituksessa KL-akun käytöllä.

5.1.3 KL-akun käyttö suurella kaukolämpökuormalla

Kuvan 11 perusteella KL-akun käytön optimointimallilla voidaan pienentää CHP-tuotannon käyttökustannuksia eniten suurien kaukolämpökuormien viikoilla. Koska nykyisellä ajomallilla ei voida suunnitella KL-akun käyttöä, kun kaukolämpökuorma on CHP-laitoksen ylärajoilla, suurien kaukolämpökuormien aikana KL-akkua käytetään manuaalisesti. Tämä johtaa siihen, että samoilla viikoilla esiintyneitä sähkön spot-hinnan suuria vuorokauden sisäisiä vaihteluita ei ole pystytty hyödyntämään KL-akun käytöllä. Tämä on havaittavissa kuvasta 27.



Kuva 27. Optimoidun ja toteutuneen KL-akun käytön vertailu suurien kaukolämpökuormien viikoilla 9 ja 10.

Kuvan 27 ylimmästä kuvaajasta pystytään välittömästi toteamaan, että optimointimallin suunnittelema käyttö on jälleen huomattavasti manuaalista käyttöä aktiivisempaa. Viikolla 9 esiintyy 4 huomattavan korkean sähkönhinnan jaksoa, joista 3 osuu päällekkäin suuren kaukolämpökuorman kanssa. Tällöin CHP-laitoksen sähköntuotanto on maksimissaan, joten KL-akun avulla ei voida näiden jaksoiden aikana lisätä sähköntuotantoa. Sen sijaan KL-akua voidaan käyttää kaukolämmöntuotannon kannattavuuden parantamiseen, joten optimointimalli tasaa KL-akun käytöllä CHP-laitoksen kaukolämpökuormaa molemmilla tarkasteltavilla viikoilla. Suurilla kaukolämpökuormilla optimointimalli ei reagoi yhtä herkästi sähkönhinnan muutoksiin kuin keskisuurilla kuormilla.

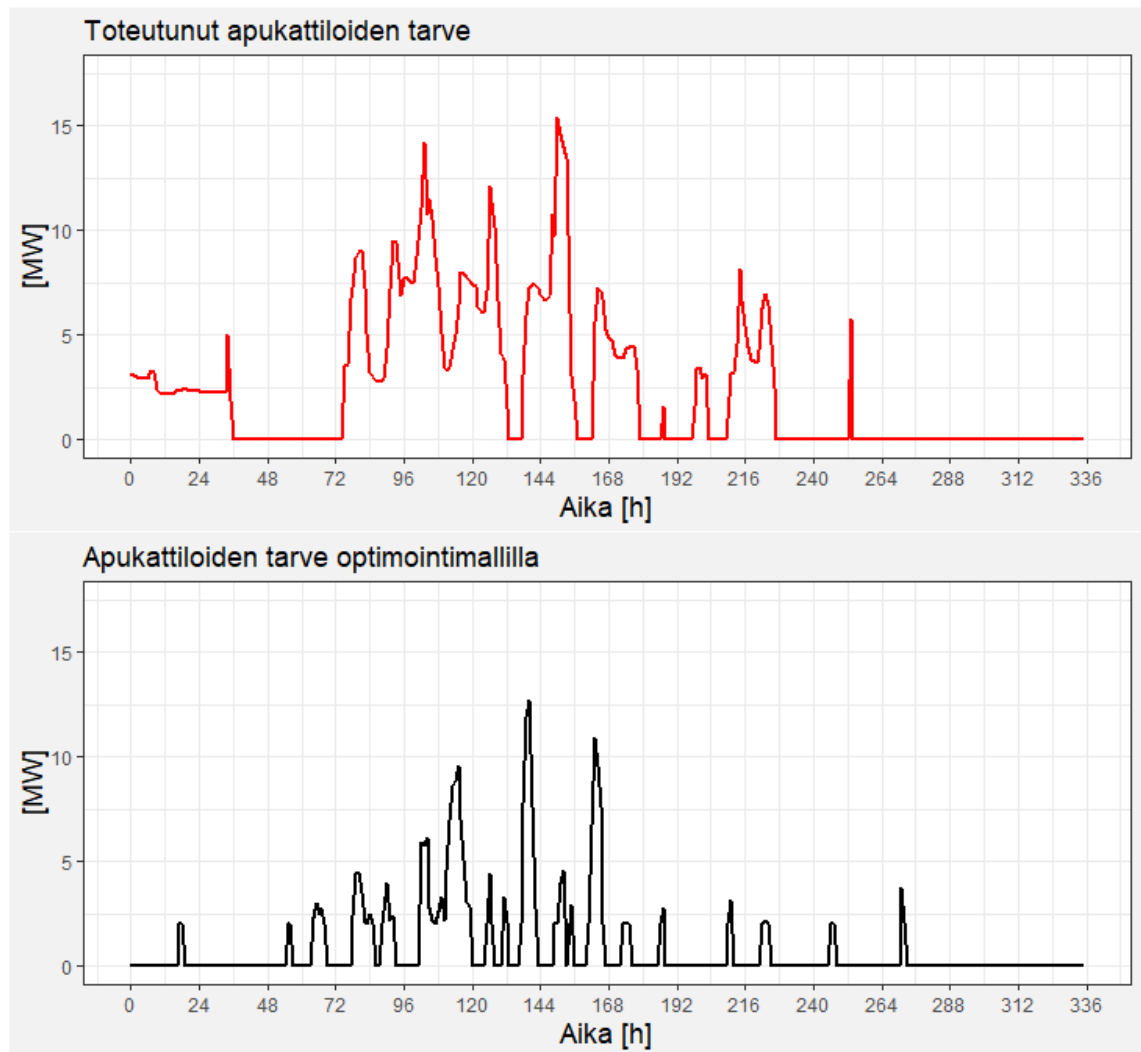
KL-akun toteutunut manuaalinen käyttö on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta hyvin samansuuntainen kuin optimointimallin suosittelu käyttö. Suurien kuormien aikaan manuaalisella käytöllä on pyritty KL-akun avulla tasaamaan CHP-laitoksen lämmöntuotantoa. CHP-laitoksen tuotantoa on kuitenkin pienennetty purkamalla akkua tuntien 50, 65 ja 270 ympärillä, jolloin sähkönhinta on ollut korkealla. Tämä on myös nähtävissä viikkojen 9 ja 10 aikana tuotetusta sähköstä saadusta keskihinnasta, joka on esitetty taulukossa 10 muiden numeeristen tuloksien kanssa.

Taulukko 10. *Vertailutulokset KL-akun käytön vaikutuksista suuren kaukolämpökuorman aikana.*

| | VIIKKO 9/2018 | | VIIKKO 10/2018 | |
|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Optimoitu käyttö | Toteutunut Käyttö | Optimoitu käyttö | Toteutunut käytöt |
| Manuaalinen operointi (Kyllä / Ei) | Ei | Kyllä | Ei | Kyllä |
| KL-akun käyttötunnit (h) | 141 | 79 | 158 | 71 |
| Tuotetun sähkön spot-hinnan keskiarvo (€/MWh) | 64.77 | 63.33 | 46.39 | 45.54 |
| KL-akun käyttötehon keskiarvo (MW) | 4.8 | 1.5 | 5.7 | 1.6 |
| Apukattiloiden tarve (MWh) | 262 | 677 | 32 | 147 |

Suuren kaukolämpökuorman aikana optimointimallin vaikutus kaukolämmöntuotannon käyttökustannuksen pienentämiseen verrattuna nykymenetelmään on huomattavaa. Viikolla 9 optimointimallin KL-akun käytöllä CHP-tuotannon käyttökustannukset olisivat olleet jopa 15 % pienemmät ja viikolla 10 noin 5.5 % pienemmät. Aikaisempien tulosten tapaan myös suurilla kaukolämpökuormilla optimointimallin KL-akun käyttötunnit ja keskimääräinen käyttöteho ovat paljon suuremmat verrattuna nykymenetelmään. Myös sähköntuotannon ajoitus on onnistunut suurien kaukolämpökuormien aikaan optimointimallilta paremmin, ja viikolla 9 tuotetusta sähköstä saatu spot-hinta olisi optimointimallin suunnitelmalla ollut jopa 1,44 € suurempi per MWh.

Eniten käyttökustannuksen pienenemistä selittää optimointimallin onnistunut KL-akun käyttö apukattiloiden tarpeen korvaamisessa. Viikolla 9 optimointimallin suunnittelema KL-akun käyttö olisi vähentänyt apukattiloiden tarvetta jopa 415 MWh verrattuna toteutuneeseen tuotantoon, joka on 72 % käyttökustannuksen muutoksesta viikolla 9. Tämä selittää muita viikkoja suuremman muutoksen käyttökustannuksessa. Myös viikolla 10 optimointimallin tuotanto olisi vähentänyt apukattiloiden tarvetta 115 MWh, joka on 64 % viikon käyttökustannuksen muutoksesta. Näissä prosenttiluvuissa ei ole vielä huomioitu CHP-laitoksen kasvanutta tuotantoa, jolloin sähköntuotanto on määrällisesti suurempaa. Kuvassa 28 on esitetty graafisesti toteutunut sekä optimointimallilla tarvittava apukattiloiden lämpöteho.



Kuva 28. Toteutunut ja optimointimallin käytöllä tarvittava apukattiloiden teho viikoilla 9 ja 10.

5.2 Käytännön rajoitteiden vaikutus KL-akun käytössä

Tässä luvussa tutkitaan optimointimallissa huomioon otettujen käytännön rajoitteiden vaikutusta KL-akun käyttöön ja saataviin käyttökustannussäästöihin. Tutkimus suoritetaan vaihtamalla optimointimalliin syötettävää parametria tai sen sisältämää rajoitetta, ja suorittamalla optimointi. Ensimmäiseksi luvussa 5.2.1 tarkastellaan parametreina syötettävien lämmöntuotantoennusteiden sisältämien virheiden vaikutusta KL-akun käytön optimointiin. Tämän jälkeen luvussa 5.2.2 tutkitaan KL-akun prosessirajoitteiden vaikutusta KL-akun käytön optimointiin.

5.2.1 Ennustevirheiden vaikutus KL-akun käytössä

Tässä luvussa vertaillaan optimointimallilla saatavia hyötyjä, kun optimoinnissa käytettävän lämmöntuotantodatan ennustevirhettä muutetaan. Lämmöntuotantodata koostuu

kaukolämpötehon ja savukaasupesurin lämmöntalteenottotehon ennusteista. Tulokset laskettiin sekä poistamalla että puolittamalla optimoinnissa käytetyn tuotantoennusteen virhe, ja vertaamalla saatuja tuloksia ennustevirheellisen optimoinnin tuloksiin. Puolitetun ja poistetun ennustevirheen vaikutukset tuotannon optimointiin ja KL-akun käyttöön on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Ennustevirheskenaarioiden vaikutukset tuotantoon.

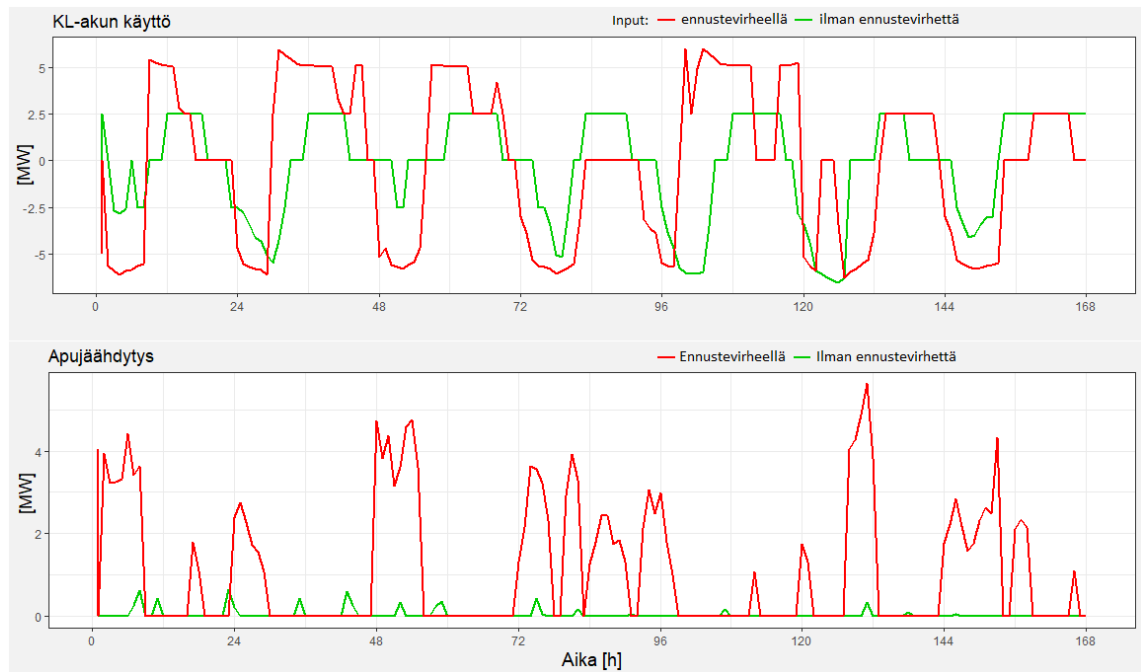
| Skenaario \ Vaikutus | käyttökustannuksiin (%) | tuotetun sähkön hintaan (%) | KL-akun käyttötunteihin (%) |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Ennustevirhe nolla | -1.52 | 0.00 | -1.05 |
| Puolitettu ennustevirhe | -0.79 | 0.10 | 0.56 |

Taulukosta 11 nähdään, että lämmöntuotannon ennustevirheellä on huomattava vaikutus KL-akun käytön optimoinnin onnistumisessa käytännön tasolla. Tämä näkyy jopa 1.5 % erona CHP-tuotannon käyttökustannuksissa. Ennustevirheen suuri vaikutus KL-käytön optimoinnin onnistumiseen johtuu kalliiden apukattiloiden ja apujäähdytyksen käytön tehokkaammasta korvaamisesta KL-akun käytön suunnittelulla, kun ennustevirheitä ei esiinny. Taulukossa 12 on esitetty ennustevirheellä, puolitetulla ennustevirheellä ja ennustevirheettömällä tuotantotiedoilla suoritettuna optimoinnin apukattiloiden sekä apujäähdytyksen tarve koko tarkasteltavan ajanjakson aikana.

Taulukko 12. Ennustevirheen vaikutus apukattiloiden ja -jäähdytyksen tarpeeseen.

| Tuotantotieto \ | ennustevirheellinen | puolitettu ennustevirhe | virheetön |
|----------------------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| Apukattiloiden tarve (MWh) | 600 | 374 | 97 |
| Apujäähdytys (MWh) | 727 | 371 | 57 |

Taulukon 12 tulosten mukaan apukattiloiden ja apujäähdytyksen tarvetta voitaisiin korvata KL-akun käytön suunnittelulla enemmän, jos lämmöntuotannon ennustetta saataisiin parannettua. Tuotannon ennustevirheen vähentämisellä puoleen onnistuttaisiin lähes puolittamaan sekä apukattiloiden että apujäähdytyksen tarve. Kuvassa 29 on esitetty graafisesti ennustevirheen sisältävän ja ennustevirheettömän optimointimallin suunnittelema KL-akun käyttö sekä apujäähdytyksen tarve matalan kaukolämpökuorman viikolla.



Kuva 29. Ennustevirheen vaikutus apujäähdityksen minimointiin KL-akun käytöllä viikolla 21.

Kuva 29 osoittaa, että ennustevirheellä optimoitu KL-akun käyttö eroaa huomattavasti ilman ennustevirhettä optimoidusta käytöstä. Samalla kuva 29 on linjassa taulukon 12 numeeristen tuloksien kanssa, ja viikon 21 apujäähdystarve on huomattavasti pienempi ilman ennustevirheen vaikutusta käytön suunnittelussa. Apujäähdityksen käytön vähentämisen lisäksi ennustevirhettä pienentämällä saataisiin vähennettyä apukattilalaitoksen käyttöä, jolloin syntyisi säästöjä edullisemman polttoaineen käytön ja kasvaneen CHP-tuotannon kautta.

5.2.2 KL-akun prosessirajoitteiden vaikutus

Tässä luvussa tarkastellaan, miten KL-akun käytännön prosessirajoitteet vaikuttavat KL-akun käyttöön, ja sillä saavutettaviin säästöihin kaukolämmöntuotannossa. Tutkimus suoritetaan poistamalla optimointimallista yksitellen kuvassa 30 esitellyt tarkasteltavaksi valitut rajoitteet ja vertaamalla optimoinnin tulosta kaikki nämä rajoitteet sisältävän optimointimallin tulokseen. Jokaisen rajoitteen yksittäisvaikutuksen lisäksi skenaariossa 6 tutkitaan rajoitteiden yhteisvaikutus KL-akun käyttöön poistamalla ne kaikki optimointimallista. Rajoitteiden vaikutuksia tutkittaessa kaikki optimoinnit suoritetaan ennustevirheettömillä lämmöntuotantotiedoilla ja optimointien aikaikkunan pituudet ovat 72 h.



Kuva 30. KL-akun käytännön rajoitteista tutkittavaksi valitut skenaariot.

Skenaarioissa 1 optimointimallin annetaan käyttää KL-akkua maksimikäyttöteholla kaukolämpökuormasta riippumatta. Skenaariossa 2 KL-akun käytön oletetaan alkavan ja loppuvan suunnitellulla teholla ilman viiveitä. Skenaario 3:ssa oletetaan, että KL-akulla ei ole minimikäyttötehoa. Seuraavaksi KL-akun varaukseen liittyvien rajoitteiden oletetaan käyttäytyvän ideaalisesti, jolloin skenaariossa 4 optimointimallista poistetaan KL-akun vähimmäisvarauksen vaatimus ja skenaariossa 5 KL-akun maksimivarausta käsitellään vakio suureena. Viimeiseksi skenaariossa 6 optimointimallista poistetaan kaikki skenaarioiden 1-5 rajoitteet. Skenaarioista saadut tulokset ovat esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Skenaarioiden vaikutus CHP-tuotantoon ja KL-akun käyttötunteihin.

| | Vaikutus käyttö-kustannuksiin (%) | Vaikutus tuotetun sähkönhintaan (%) | KL-akun käyttö-tunteihin (%) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Max. käyttöteho vakio | -0.27 | 0.60 | 0.55 |
| Viiveetön käyttö | -0.17 | 0.07 | 1.12 |
| Min. käyttöteho 0 MW | -0.18 | 0.57 | 0.55 |
| Min. varaus 0 MWh | -0.06 | 0.02 | 0.54 |
| Max. varaus vakio | -0.06 | 0.01 | 1.19 |
| Yhteisvaikutus | -0.74 | 0.97 | 5.38 |

Taulukosta 13 nähdään, että yksittäisistä rajoitteista suurin vaikutus on maksimikäyttötehon pitämisellä vakiona joka tilanteessa. Sen prosentuaalista vaikutusta käyttökustannuksiin voidaan pitää merkittävänä, kun lasketaan suurella KL-akulla saatavia käyttökustannussäästöjä. Seuraavaksi suurimmat vaikutukset käyttökustannuksiin ovat rampitusviiveen ja minimikäyttötehon rajoitteilla. Rampitusviiveen poistamisen vaikutukset eroavat käyttötehon rajoituksista taulukon 13 mukaan siinä, että sen vaikutus ei toteudu sähkön tuotannon ajoittamisella, vaan KL-akun käyttötuntien kasvattamisella.

Mielenkiintoista on, että eniten vaikuttavat rajoitteet ovat sellaisia, joita voidaan muuttaa myös olemassa olevassa KL-akussa tuotannonsuunnittelun, säätötekniikan tai pienien fyysisten prosessimuutosten avulla. Esimerkiksi maksimikäyttöteho voi olla mahdollista pitää vakiona riippumatta kaukolämpökuormasta järjestelmätason tuotannonsuunnittelun

avulla. Järjestelmätason tuotannonsuunnittelu voisi jopa mahdollistaa suurimman mahdollisen käyttötehon kasvattamisen. Minimikäyttötehoa voitaisiin laskea lisäämällä pienemmät lataus- ja purkupumput nykyisten pumppujen rinnalle. Samalla tavalla nämä rajoitteet ovat huomioitavissa myös uuden KL-akun suunnittelussa.

Tuloksista on todettavissa, että KL-akun vähimmäis- ja maksimivarauksen rajoitteen muuttaminen ideaaliseksi vaikuttaa CHP-tuotannon käyttökustannukseen selvästi muita tarkasteltuja rajoitteita vähemmän. Vaikka varausrajoitteiden muuttaminen ideaaliseksi kasvattaa KL-akun käyttötuntien määrää 0.54 – 1.19 %, on niiden vaikutus sähköstä saatavaan hintaan alle tuhannesosan. Samalla varauksien ideaalinen käsitteleminen optimointimallissa voi johtaa tilanteeseen, jossa optimointimallin suunnittelema KL-akun käyttö ei ole mahdollista toteuttaa käytännössä.

Varauksien minimi- ja maksimiarvot ovat rajoitteita, joihin ei voida käytännössä vaikuttaa ilman suuria fyysisiä muutoksia KL-akkussa. Tämän takia varausrajoitteet eivät ole yhtä mielenkiintoisia kuin muut tarkastellut rajoitteet KL-akkuprosessin kehityksen kannalta, varsinkin, kun niiden tuomat taloudelliset hyödyt vaikuttavat pieniltä.

Saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että yksittäisen käytännön rajoitteen muuttaminen ideaaliseksi tai lähemmäs ideaalista, ei vaikuta merkittävästi KL-akun käyttöön tai KL-akun avulla saataviin taloudellisiin hyötyihin. Silti tarkasteltujen rajoitteiden yhteisvaikutus CHP-tuotannon vuosikäyttökustannuksissa on huomattava (-0.74 %), joten niiden yhtäaikainen yksinkertaistaminen johtaa simuloitavan ja käytännössä saavutettavan tuloksen eroamiseen toisistaan.

6. POHDINTA

Luvussa 5 esitellyt tulokset osoittavat selvästi, että KL-akun käytön optimoinnilla ja automaattisella lyhyen aikavälin käytön suunnittelulla voidaan parantaa useita prosentteja CHP-tuotannon kannattavuutta nyky menetelmään verrattuna. Työssä tehty optimointimalli pystyy kuvaamaan matemaattisesti KL-akusysteemiä osana CHP-tuotantoa sillä tasolla, että sitä voidaan käyttää osana KL-akun automaattista käyttöä.

Optimointimallin todettiin toimivan sille määritellyn kustannusfunktion sekä rajoiteyhtälöiden puitteissa. Tulokset olivat järkeviä ja vertailukelpoisia nykykäytäntöön. Liukuvan aikaikkunan menetelmän käyttäminen optimointimallissa toimi moitteettomasti, ja toi hyötyjä erityisesti lämpökuormien tasaamiseen.

Optimointimallin kustannusfunktiolla pyrittiin minimoimaan CHP-laitoksen käyttökustannus kaukolämmöntuotannossa. Optimointi pyrki ajoittamaan sähköntuotannon kannattaville tunneille, ja minimoimaan apujäähdytyksen sekä -kattiloiden tarpeen. Ennustevirheiden vaikutuksia sähköntuotantoon tai lämpötaseisiin ei huomioitu optimoinnissa, vaan optimointimalli olettaa ennusteiden olevan virheettömiä.

Optimointimallin todettiin kokonaisuudessaan parantavan CHP-tuotannon kannattavuutta, ja optimointimalli pienensi muuttamaa viikkoa lukuunottamatta CHP-tuotannon käyttökustannuksia nykykäytäntöä enemmän. Vaikka optimointimalli vähentää CHP-tuotannon käyttökustannuksia vuositasolla vain 2.3 % nykykäytäntöön nähden, on vaikutus KL-akun kannattavuuteen jopa kolminkertainen. Matemaattisella optimoinnilla saadun parannuksen vähäisyyttä selittää osaltaan myös Forssassa käytössä oleva KL-akun ajo-malli, jolla jo entuudestaan n. puolet ajasta sähköntuotannon kannattavuutta nostetaan automaattisella KL-akun käytöllä.

Suurin etu tehdyn optimointimallin ja nykykäytännön välillä on automaattisen KL-akun käytön lisääminen, joka näkyy KL-akun käyttötuntien systemaattisena kasvuna. Toisin kuin nykykäytännössä, optimointimalli pystyy huomioimaan kymmenien parametrien vaikutukset tuotantoon usean päivän pituisella ajanjaksolla. Tämän vuoksi KL-akun käyttö voidaan suorittaa automaattisesti vuoden ympäri, jolloin saman vuorokauden aikana käyttökustannuksia voidaan vähentää sekä sähköntuotannon siirtämisellä että apujäähdytyksen tai -kattiloiden korvaamisella.

Optimointimallin toiminnassa suurimmaksi heikkoudeksi todettiin lämmöntuotantoennusteiden virheellisyys. Optimointimallista saatu tulos voi olla vain yhtä hyvä kuin sen parametreina käytettävät tuotantoennusteet. Ennustevirheet eivät vaikuttaneet niinkään sähköntuotannon ajoituksen onnistumiseen, mutta aiheuttivat huomattavasti lisäkustan-

nuksia apukattiloiden ja -jäähdytyksen lisääntyneenä käyttönä. Tämän vuoksi optimoinnissa käytettävien ennusteiden virheet ovat suurin ongelma täysin automaattisen KL-akun käytön saavuttamisessa. Syy ei kuitenkaan ole tehdyssä optimointimallissa, vaan optimoinnissa käytettävässä, mallin ulkopuolella määritettävässä, parametrissa. Siten tehdyllä optimointimallilla todetaan olevan lisäpotentiaalia parantaa nykykäytäntöä, jos siinä tarvittavia parametreja saadaan tarkemmiksi.

KL-akun yksittäisten prosessirajoitteiden poistamisen tai muuttamisen vaikutukset käyttökustannukseen olivat pienet lämmöntuotantoennusteiden parantamista lukuun ottamatta. Silti näiden rajoitteiden muuttamisella, tai jopa poistamisella, voidaan saavuttaa lisäsäästöjä sekä tuotantoon joustavuutta, esimerkiksi suuremman käyttötehon mahdollistamisella tai rampitusaikojen lyhentämisellä. Lisäksi käytännön rajoitteiden yhteisvaikutuksen huomattiin olevan jo merkittäväällä tasolla, joten tässä työssä tehty tarkempi prosessirajoitteiden mallinnus on hyödyllinen uuden KL-akun teknisessä suunnittelussa ja investoinnissa.

Rampitusviiveen vaikutus käyttökustannuksiin todettiin tutkimuksessa pieneksi, mutta tämän rajoitteen merkitys voi kasvaa huomattavasti, kun pohjoismaisissa sähköverkoissa siirrytään nykyisestä tuntitaseesta varttitaseeseen vuoden 2020 loppuun mennessä [32]. Tämän vuoksi rampitusviiveen mallinnusta tulisi jatkossa kehittää paremmaksi, koska tässä työssä käytetty rampitusta kuvaava kustannus ei ole toimiva tapa kuvata viivettä tarkemmalla tasolla. Tarkempi rampitusviiveen matemaattinen mallinnus voitaisiin toteuttaa esimerkiksi epälineaarilla optimointimallilla.

Jotta KL-akun koko potentiaalia voitaisiin hyödyntää CHP-tuotannossa, tarvitsisi tuotannon optimointi suorittaa koko kaukolämpösystemin tasolla. Tällöin KL-akun käyttö suuremmalla teholla ei aiheuttaisi virtauksen tai paineen liiallista kasvua kaukolämpöverkossa, ja mahdollistaisi siten vähintään tuloksissa lasketut lisähyödyt vakiona pidettävän maksimikäyttötehon osalta. Kasvaneiden KL-akun käytön hyötyjen lisäksi järjestelmätason optimointi johtaisi todennäköisesti muihinkin hyötyihin, kuten kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden pienenemiseen ja savukaasupesurin lämmöntalteenottotehon kasvamiseen.

Työssä tehdyllä optimointimallilla on sovelluskohteita pelkästään Suomessa arviolta 30 kappaletta. Vaikka optimointimalli ratkaistiin tämän työn tuloksia laskettaessa kaupallisella ratkaisimella, voidaan se ratkaista myös avoimesti saatavilla olevilla ratkaisimilla. Tällöin KL-akun käytön suunnittelu toteutetaan täysin avoimella lähdekoodilla, jolloin se on lisenssimaksuja sisältäviä kaupallisia optimointijärjestelmiä huomattavasti edullisempi. Näin tehdyn optimointimallin soveltaminen on kannattavaa jopa Forssan KL-akua pienemmissä KL-akuissa.

7. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin KL-akun käytön optimoinnilla ja automaattisella suunnittelulla saavutettavia hyötyjä CHP-tuotannossa sekä käytännön prosessirajoitteiden vaikutusta niihin. Työn tavoitteena oli tutkia, kuinka paljon KL-akun käytön nykykäytäntöä voidaan parantaa hyödyntämällä matemaattista optimointia. Lisäksi tavoitteena oli muodostaa käsitys lämmöntuotannon ennustevirheiden ja käytännön prosessirajoitteiden vaikutuksesta KL-akun hyödyntämiseen CHP-tuotannossa. Optimoinnin suorittamiseksi CHP-tuotanto KL-akkuineen mallinnettiin matemaattisesti MILP-ongelmaksi. Optimointimalliin sovellettiin liukuvan aikaikkunan menetelmää, jotta KL-akun käyttö soveltuu käytettäväksi jatkuvassa tuotannossa. Tutkimustulokset määritettiin käyttämällä tehtyä optimointimallia olemassa olevan KL-akun käytön suunnitteluun todellisten tuotantotietojen avulla.

KL-akun käyttö suunniteltiin optimointimallin avulla yhden vuoden pituiselle ajanjaksolle. Tuloksia verrattiin nykykäytännöllä suunniteltuun ja toteutettuun KL-akun käyttöön. Toteutuneeseen KL-akun käyttöön verrattuna optimointimallin suunnittelema KL-akun käytöllä CHP-tuotannon käyttökustannukset olisivat olleet 2.3 % nykyistä pienemmät. Säästöt olisi saavutettu kasvattamalla CHP-tuotannon osuutta, sähköntuotannon kannattavammalla ajoituksella sekä apukattiloiden ja -jäähdytyksen käytön tarpeen vähentämisellä. Optimointimallin suunnittelema KL-akun käyttö oli epäedullista ainoastaan silloin, kun parametreina käytetyt lämmöntuotantoennusteet olivat virheellisiä.

Lämmöntuotannon ennustevirheiden ja käytännön prosessirajoitteiden vaikutusta KL-akun automaattiseen käyttöön tutkittiin. Käytännön rajoitteista vain lämmöntuotannon ennustevirheiden todettiin vaikuttavan huomattavasti KL-akun käytön suunnittelun onnistumiseen, ja siten CHP-tuotannon käyttökustannuksien pienentämiseen. Sen sijaan muiden prosessirajoitteiden yksittäinen vaikutus todettiin pieneksi, mutta niiden kokonaisvaikutus kannattaisi huomioida esim. KL-akun mitoitus- ja investointilaskelmissa.

Tehtyä optimointimallia voitaisiin kehittää huomioimalla KL-akussa, ja sen käytössä, tapahtuvien lämpöhäviöiden vaikutus sekä tekemällä mallista epälineaarinen. Huomioimalla lämpöhäviöt KL-akun käytön kustannukset voitaisiin kuvata tarkemmin. Epälineaarilla mallilla KL-akun käytön aloitus- ja lopetusrampitukset voitaisiin kuvata matemaattisesti tarkemmin, joka myös osaltaan parantaisi KL-akun käyttökustannuksien mallinnusta.

Työn merkittävimmät tulokset olivat saavutettavat säästöt CHP-tuotannon käyttökustannuksissa ja lämmöntuotannon ennustevirheen huomattavan vaikutuksen havaitseminen KL-akun käytön suunnittelussa. Tehdyllä mallilla manuaalisia käyttötunteja voitaisiin vähentää, ja siten nostaa KL-akun käytön automaatioastetta. Työssä huomattiin myös, että

KL-akun suunniteltua käyttöä olisi mahdollista tehostaa, jos kaukolämmöntuotannon suunnittelua optimoitaisiin järjestelmätasolla eikä ainoastaan KL-akun käytön osalta. Tällöin osaa KL-akun käytännön prosessirajoitteista voitaisiin keventää.

Tämän työn tavoitteena oli luoda käytännössä toimiva KL-akun käytön suunnittelumalli, joka perustuu matemaattiseen optimointiin. Tehty ratkaisu on MILP-optimointimalli, johon sovelletaan liukuvan aikaikkunan menetelmää. Optimointimalli todettiin toimivaksi ratkaisuksi KL-akun käytön suunnittelun automatisoimiseksi ja optimoimiseksi sekä käytännön rajoitteiden vaikutusten tarkastelemiseksi.

LÄHTEET

- [1] S. Kelly, M. Pollitt, An assessment of the present and future opportunities for combined heat and power with district heating (CHP-DH) in the United Kingdom, *Energy Policy*, Vol. 38, Iss. 11, 2010, s. 6936-6945.
- [2] Energiategollisuus ry, Finnish electricity statistics 2017, Saatavissa (viitattu 3.7.2018): https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot.
- [3] M. Bianchi, A. De Pascale, Emission calculation methodologies for CHP plants, *Energy Procedia*, Vol. 14, 2012, s. 1323-1330.
- [4] C. Milan, M. Stadler, G. Cardoso, S. Mashayekh, Modeling of non-linear CHP efficiency curves in distributed energy systems, *Applied Energy*, Vol. 148, 2015, s. 334-347.
- [5] Valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta, 1549/2016, 2016. Saatavissa (viitattu 3.7.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161549#Pidp458514816>.
- [6] A. Fragaki, A.N. Andersen, D. Toke, Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK, *Energy*, Vol. 33, Iss. 11, 2008, s. 1659-1670.
- [7] G. Streckienė, V. Martinaitis, A.N. Andersen, J. Katz, Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market, *Applied Energy*, Vol. 86, Iss. 11, 2009, s. 2308-2316.
- [8] GAMS development Corporation, General Algebraic Modeling System, Saatavissa (viitattu 15.8.2018): https://www.gams.com/latest/docs/UG_GAMSPrograms.html.
- [9] IBM, IBM ILOG CPLEX, Saatavissa (viitattu 15.8.2018) https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.7.0/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf.
- [10] A. Christidis, C. Koch, L. Pottel, G. Tsatsaronis, The contribution of heat storage to the profitable operation of combined heat and power plants in liberalized electricity markets, *Energy*, Vol. 41, Iss. 1, 2012, s. 75-82.
- [11] M. Giuntoli, D. Poli, Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, Iss. 2, 2013, s. 942-955.
- [12] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael, D. Six, Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating, *Applied Energy*, Vol. 104, 2013, s. 583-591.

- [13] M. Noussan, G. Cerino Abdin, A. Poggio, R. Roberto, Biomass-fired CHP and heat storage system simulations in existing district heating systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, Iss. 2, 2014, s. 729-735.
- [14] T. Fang, R. Lahdelma, Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method, *Applied Energy*, Vol. 162, 2016, s. 723-732.
- [15] Y. Zheng, B.M. Jenkins, K. Kornbluth, A. Kendall, C. Træholt, Optimal design and operating strategies for a biomass-fueled combined heat and power system with energy storage, *Energy*, Vol. 155, 2018, s. 620-629.
- [16] J. Novak, P. Chalupa, V. Dolinay, L. Vasek, CHP production optimization based on receding horizon strategy, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 505, 2018, s. 110.
- [17] M. Kia, M.S. Nazar, M.S. Sepasian, A. Heidari, P. Siano, Optimal day ahead scheduling of combined heat and power units with electrical and thermal storage considering security constraint of power system, *Energy*, Vol. 120, 2017, s. 241-252.
- [18] G.E. Phetteplace, District heating guide, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, 2013.
- [19] L. Koskelainen, R. Saarela, K. Sipilä, *Kaukolämmön käsikirja*, Energiateollisuus, Helsinki, 2006, 566 s.
- [20] R. Wiltshire, *Advanced district heating and cooling (DHC) systems*, Elsevier Science & Technology, 2016, 365 s.
- [21] K. Badyda, W. Bujalski, G. Niewiński, M. Warchoń, Selected issues related to heat storage tank modelling and optimisation aimed at forecasting its operation, *Archives of Thermodynamics*, Vol. 32, Iss. 3, 2011, s. 3-31.
- [22] R. Risto, K. Kirvelä, H. Tolvanen, A. Pääkkönen, *Energiatekniikan perusteet. Luentomoniste. Energia- ja prosessitekniikan laitos*, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015, 183 s.
- [23] R. Kara, *Energian varastointi, Sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus*, Espoo, 1987, 620 s.
- [24] M. Huhtinen, A. Kettunen, P. Nurminen, H. Pakkanen, *Höyrykattilatekniikka*, Helsinki, 2004, 379 s.
- [25] M. Bianchi, A. De Pascale, F. Melino, A. Peretto, Performance prediction of micro-CHP systems using simple virtual operating cycles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71, Iss. 2, 2014, s. 771-779.
- [26] H. Wang, W. Yin, E. Abdollahi, R. Lahdelma, W. Jiao, Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage, *Applied Energy*, Vol. 159, 2015, s. 401-421.

- [27] A. Rong, H. Hakonen, R. Lahdelma, An efficient linear model and optimisation algorithm for multi-site combined heat and power production, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, Iss. 2, 2006, s. 612-632.
- [28] S. Makkonen, R. Lahdelma, Non-convex power plant modelling in energy optimisation, *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, Iss. 3, 2006, s. 1113-1126.
- [29] D. Yue, G. Guillén-Gosálbez, F. You, Global optimization of large-scale mixed-integer linear fractional programming problems: A reformulation-linearization method and process scheduling applications, *AIChE Journal*, Vol. 59, Iss. 11, 2013, s. 4255-4272.
- [30] J. Kymäläinen, Vapon sisäinen dokumentti, 2006.
- [31] Pöyry Management Consulting Oy, Polttoaineiden hintatietoja, Vapon sisäinen dokumentti, 2018.
- [32] Pöyry Management Consulting Oy, 15 minutes imbalance settlement period – market impacts of late implementation, Fingrid, Saatavissa (viitattu 7.2.2019): https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/varttitase/final_15_min_isp_derogation_report_poyry.pdf.